



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio del cauce de alivio artificial del río Zadorra en Vitoria, y de la idoneidad de los modelos 1D y 2D en zonas de flujo complejo

Trabajo realizado por:

Adrián Guerricagoitia Salvador

Dirigido por:

Juan Pedro Martín Vide

Máster en:

Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Barcelona, 26 de enero de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Resumen

Estudio de la solución adoptada por la administración hidráulica vasca para paliar los efectos de las crecidas del río Zadorra en la periferia norte de la ciudad de Vitoria. Dicha solución consiste en la construcción de un cauce de alivio auxiliar que discurre de forma paralela al río, que tiene la función de desviar parte del agua del Zadorra lejos del núcleo urbano. La particularidad de esta solución es que abarca el tramo en que el Zadorra recibe la aportación de uno de sus principales afluentes, el río Alegría, que puede condicionar el funcionamiento del cauce de alivio.

La zona de estudio, con una fuerte componente bidimensional fruto de la confluencia de los diferentes cauces, proporciona un buen escenario para estudiar la validez de los modelos de cálculo unidimensional y bidimensional para explicar el comportamiento hidráulico de la zona, y explorar las limitaciones que ambos presentan al describir zonas de flujo complejo.

Resum

Estudi de la solució presa per l'administració hidràulica basca per minimitzar els efectes de les crescudes del riu Zadorra a la perifèria nord de la ciutat de Vitòria. Aquesta solució consisteix en la construcció d'una llera d'alleugeriment artificial paral·lela al riu, amb la funció de desviar part de les aigües del Zadorra lluny del nucli urbà. La particularitat d'aquesta solució és que comprèn un tram on el Zadorra rep l'aportació d'un dels seus principals afluent, el riu Alegría, que pot condicionar el funcionament de la llera d'alleugeriment.

La zona d'estudi, amb una forta component bidimensional com a resultat de la confluència de les diverses lleres dels rius, proporciona un bon escenari per estudiar la validesa dels models de càlcul unidimensional i bidimensional. Així, es pretén explicar el comportament hidràulic de la zona, i explorar les limitacions que tots dos models presenten al descriure zones de flux complex.

Abstract

Study of the solution taken by the Basque hydraulic administration in order to reduce the effects of the swelling of the Zadorra River on the northern outskirts of the city of Vitoria. This solution consisted in the construction of an overflow channel running side by side to the main river, with the objective of drifting part of the waters of the Zadorra River away from the city center. The distinctive feature of this channel is that it spans over the same area where the Zadorra River meets one of its main tributaries, the Alegría River, which may condition the performance of the overflow channel.

The studied area, with a strong two-dimensional nature as a result of the concentration of the different river courses, proves to be a good setting to study suitability of the one and two-dimensional models when it comes to explaining the hydraulic behavior of the area and explore their limitations at describing complex-flow areas.

Índice

1. Introducción	12
1.1. Ubicación del estudio y toponimia	12
1.2. Antecedentes	14
1.3. Motivación y objetivo del estudio	14
1.4. Fuentes de información	16
2. Descripción del río y la zona de estudio	17
2.1. Los cauces del sistema fluvial Zadorra, cauce de alivio y Alegría	19
2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial.....	21
2.3. Régimen hidrológico del Zadorra	29
3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica	32
3.1. Características de los modelos hidráulicos originales entregados por URA	33
3.2. Modificaciones realizadas en el marco del estudio de inundaciones de URA	35
3.3. Preparación de los modelos hidráulicos en el marco del presente estudio	38
4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría	42
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento.....	42
4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento	57
4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio	69
5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio	74
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional ...	75
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D....	86
5.3. Impacto de un tratamiento igual de las rugosidades en los modelos 1D y 2D	95
6. Conclusiones.....	98
7. Futuras líneas de investigación.....	100
8. Bibliografía	101

Índice de figuras

1. Introducción	12
Figura 1. Esquema del sistema fluvial que se pretende caracterizar en este estudio.	12
Figura 2. Ortofoto del curso del Zadorra y Alegría (indicados en azul) a su paso por la Llanada Alavesa y la ciudad de Vitoria, sobre la que se marcan los diferentes topónimos utilizados en el estudio.....	13
2. Descripción del río y la zona de estudio	17
Figura 3. Ubicación de la cuenca hidrográfica del Zadorra (junto con la de los ríos Bayas e Inglares) dentro del conjunto de la cuenca hidrográfica del Ebro.....	18
Figura 4. Esquema de la cuenca hidrográfica del Zadorra, Bayas e Inglares, sobre el que se indican los principales afluentes y embalses del sistema fluvial del Zadorra.....	18
Figura 5. Ubicación de las observaciones y tomas de muestras realizadas para determinar la naturaleza del lecho del Zadorra.	19
Figura 6. Imagen del cauce de alivio seco en medio del periodo de aguas bajas del Zadorra.	20
Figura 7. Fotografía del cauce del Alegría en su último puente antes de su confluencia con el Zadorra.	20
Figura 8. Fotografía de la presa de Ullívarri-Gamboa.....	22
Figura 9. Ortofoto de la zona de estudio del vuelo americano de los años 1945/46, previa a la construcción de la presa de Ullívarri-Gamboa y del encauzamiento del Alegría.	22
Figura 10. Ortofoto de la zona de estudio del año 1984, posterior tanto a la construcción de la presa de Ullívarri-Gamboa como al encauzamiento del Alegría.	23
Figura 11. Ortofoto del año 2016 de la zona de estudio.....	23
Figura 12. Fotografía del azud de derivación del cauce de alivio del Zadorra.	24
Figura 13. Ortofoto del año 2002. Detalle de la zona de estudio previa a la construcción del cauce de alivio.	25
Figura 14. Ortofoto del año 2005. Detalle de la zona de estudio inmediatamente después de la puesta en funcionamiento del cauce de alivio.	25
Figura 15. Fotografía del puente de la carretera que va a Zurbano, en que se aprecia la extensa vegetación que puebla el cauce encauzado del tramo final del Alegría.	26
Figura 16. Vista desde el puente de Gamarra de las pilas del azud de la antigua piscina fluvial del Zadorra.	27
Figura 17. Figura basada en la ortofoto del año 2016 en la que se indican la ubicación (o extensión) de las intervenciones realizadas en los cauces y llanuras de Zadorra y Alegría en la zona de estudio.	28

Figura 18. Representación de la evolución de los caudales en Abetxuko y calados en Mendivil que han servido para identificar los episodios de inundación del Zadorra.....	29
Figura 19. Precipitaciones medias mensuales registradas en el Zadorra (años 1928-2003) y volumen medio mensual embalsado en Ullívarri-Gamboa (años 1965-2004).....	30
Figura 20. Valor de los caudales asignados a cada cauce de la zona de estudio para cada periodo de retorno considerado.....	31
3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica	32
Figura 21. Esquema de la extensión de la geometría del modelo Hec-Ras original entregado por URA.....	33
Figura 22. Detalle de una de las mallas de Iber (izquierda), y su extensión sobre una ortofoto del Zadorra a su paso por Vitoria (derecha).....	34
Figura 23. Mensaje de error que proporciona Iber cuando el agua alcanza la cota superior de la compuerta que se utilizaba para modelar los ojos de los puentes.....	34
Figura 24. Nueva extensión del esquema fluvial utilizado en Hec-Ras.	35
Figura 25. Ubicación de las estaciones de aforo del SAIH (marcadas en rojo) sobre una ortofoto del Zadorra a su paso por Vitoria.	36
Figura 27. Ejemplo de las modificaciones en la malla que produce la adición de un puente con la herramienta integrada en Iber.	37
Figura 28. Representación del sentido del flujo de Hec-Ras para los dos tipos de geometría considerados.....	39
Figura 29. Ejemplo de la inversión de los diferentes parámetros de las secciones transversales (topografía, obstrucciones, área inefectiva) al realizar el cambio de sentido en el Zadorra-9.	40
Figura 30. Ilustración de la extensión de la nueva malla utilizada en Iber.....	41
4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría	42
Figura 31. Mensaje de error proporcionado por Hec-Ras en aquellos casos en que falla y no logra dar un resultado para la optimización del reparto de caudales.	43
Figura 32. Esquema de los sentidos del flujo en la geometría original de Hec-Ras (izquierda) y en la nueva geometría de flujo inverso (derecha).....	44
Figura 33. Sentido del flujo de cada río para un funcionamiento normal del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría.	45
Figura 34. Sentido del flujo de cada río para un funcionamiento inverso del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría.	46
Figura 35. Límite de los dominios de las combinaciones de caudales que definen cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial, obtenido con Hec-Ras.	47

Figura 36. Límite de los dominios de las combinaciones de caudales que definen cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial, obtenido con Iber.....	48
Figura 37. Representación de los vectores de velocidad obtenidos con Iber para algunos casos límite de funcionamiento inverso en los que se detecta desbordamiento en los márgenes.	49
Figura 38. Diferencia en caudal de entrada del Alegría entre las curvas límites del funcionamiento normal e inverso.	49
Figura 39. Vectores de velocidades obtenidos en el Zadorra-9 para un caso límite de funcionamiento inverso (izquierda) y uno de la zona de frontera (derecha) con el mismo caudal en entrada en el Zadorra.....	51
Figura 40. Diferencia entre las curvas límite de los distintos modelos, diferenciados según cada tipo de funcionamiento.	51
Figura 41. Resumen de las curvas límite de cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría, para ambos modelos de cálculo utilizados.	53
Figura 42. Isolíneas del porcentaje de caudal que desvía el azud hacia el cauce de alivio respecto al caudal de entrada en el Zadorra.	55
Figura 43. Detalle de las isolíneas del caudal desviado al cauce de alivio, sobre el que se superponen varias isolíneas de la suma de las aportaciones de Zadorra y Alegría.	56
Figura 44. Esquema de la geometría del azud para los diferentes casos considerados, visto desde aguas arriba hacia aguas abajo considerando condiciones de flujo normal en el Zadorra-9.	58
Figura 45. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría nulos y los diferentes escenarios de abertura considerados.	59
Figura 46. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría nulos y los diferentes escenarios de abertura considerados.....	59
Figura 47. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 30% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.....	60
Figura 48. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 30% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.	60
Figura 49. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 60% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.....	61
Figura 50. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 60% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.	61

Figura 51. Diferencia de niveles de agua antes y después del azud para dos escenarios de abertura diferentes, tanto en valor absoluto (figuras superiores) como porcentuales (figuras inferiores).....	63
Figura 52. Diferencia de niveles de agua antes y después del azud para los tres conjuntos de valores de caudales del Alegría.....	64
Figura 53. Perfil en el que se evalúa la cota del agua con el objeto de medir la diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo del azud.....	64
Figura 54. Representación del eje (línea roja) en el que se han tomado los valores de las componentes horizontal y vertical de la velocidad sobre el azud.	65
Figura 55. Representación de una distribución de velocidades de tipo 1.	66
Figura 56. Representación de una distribución de velocidades de tipo 2.	66
Figura 57. Representación del campo de vectores por encima del azud para un caso de perfil de tipo 1 (izquierda) y tipo 2 (derecha).....	67
Figura 58. Representación de una distribución de velocidades de tipo 3.	68
Figura 59. Sección en que se han estudiado los perfiles de velocidad antes y después de la implementación del cauce de alivio, tanto en Hec-Ras como en Iber.	70
Figura 60. Ejemplo de un perfil de velocidades de Iber y cálculo de su velocidad media en la sección.....	70
Figura 61. Puntos en que se ha medido el nivel del agua antes y después de la implementación del cauce de alivio.....	71
Figura 62. Mancha de inundación de un mismo episodio de crecida del Zadorra para la geometría con cauce de alivio (arriba) y sin él (abajo).	73
5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio	74
Figura 63. Ejemplos de interacción entre los flujos de los dos ramales paralelos.	74
Figura 64. Secciones introducidas en Hec-Ras para caracterizar el cauce de alivio (secciones en rojo) y el cauce natural del Zadorra (secciones en gris).	75
Figura 65. Representación de un par de secciones transversales del cauce natural del Zadorra (gris) con su continuación en el cauce de alivio (rojo), con (izquierda) y sin (derecha) interacción entre ramales.....	76
Figura 66. Representación del error que se comete al descartar algunas secciones al estudiar la interacción entre cauces.	76
Figura 67. Campo de velocidades obtenido en Iber para el caso representado en la Figura 66. 77	
Figura 68. Geometrías sobre las que se comprobarán las magnitudes de estudio en la interfase.	78

Figura 69. Representación de la inconveniencia de comparar velocidades en la interfase para un caso de funcionamiento inverso.....	78
Figura 70. Esquema de la geometría modificada en Hec-Ras.	81
Figura 71. Comparativa de los errores relativos promedio de velocidades (arriba) y calados (abajo) en la interfase entre el cauce natural del Zadorra y el cauce de alivio.	83
Figura 72. Geometrías que se utilizan en el análisis del comportamiento de las curvas límites que definen el dominio de flujo normal e inverso.....	84
Figura 73. Recreación de la Figura 35 con los resultados recalculados para las tres geometrías consideradas.	85
Figura 74. Ubicación de las secciones en que se estudia la posición óptima de la interfase con el objetivo de equiparar el perfil de velocidades de la llanura entre los dos ramales.	87
Figura 75. Representación de las secciones con las que se estudiará la posición óptima de la interfase.....	88
Figura 76. Evolución del proceso de optimización de la posición de la interfase de la sección 218, junto con sus perfiles de velocidades en ambos ramales.	89
Figura 77. Evolución del proceso de optimización de la posición de la interfase de la sección 282, junto con sus perfiles de velocidades en ambos ramales.	90
Figura 78. Perfil de velocidades en ambos ramales de la sección 282 para el caso de 50 m ³ /s en Zadorra y Alegría y posición original de la interfase.	91
Figura 79. Ejemplo del cálculo del coeficiente de Coriolis.	93
Figura 80. Comparación de los perfiles de velocidad obtenidos en Hec-Ras e Iber en la sección 218 para caudales de 30 m ³ /s en el Zadorra y 20 m ³ /s en el Alegría, sobre la topografía obtenida en Iber.....	93
Figura 81. Comparación de los perfiles de velocidad obtenidos en Hec-Ras e Iber en la sección 282 para caudales de 80 m ³ /s en el Zadorra y 70 m ³ /s en el Alegría, sobre la topografía obtenida en Iber.....	94
Figura 82. Comparación entre los resultados para las rugosidades originales (izquierda) y para las rugosidades reducidas en un 25% (derecha) para los dos casos de estudio.....	96
Figura 83. Representación del comportamiento esperado y observado de los límites de las zonas de dominio en función de los resultados obtenidos con la reducción de rugosidades en Iber.	97

Índice de tablas

2. Descripción del río y la zona de estudio

Tabla 1. Principales características del Zadorra y sus principales afluentes.17

Tabla 2. Episodios de inundación de la Llanada Alavesa en el periodo mayo 2012-setiembre 2016.
.....29

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

Tabla 3. Parte de los primeros casos ejecutados en Hec-Ras para intentar establecer un patrón en el reparto de caudales en el azud.43

Tabla 4. Resultados de las combinaciones de caudales de la Tabla 3 calculadas con la nueva geometría de flujo inverso en el tramo Zadorra-9.....44

Tabla 5. Dimensiones de las áreas de frontera definidas entre las curvas límite del flujo normal e inverso.48

Tabla 6. Combinaciones de caudales que se utilizan en el estudio de la variación del reparto de caudales para diferentes aberturas del azud.59

Tabla 7. Valores de la diferencia del nivel de agua aguas arriba y aguas abajo del azud.62

Tabla 8. Clasificación de los casos de estudio en función del tipo de distribución de velocidades que presentan.....68

Tabla 9. Resultados obtenidos en Iber de la variación de las velocidades medias antes y después del cauce de alivio.71

Tabla 10. Variación entre los niveles antes y después del cauce de alivio dividida por el calado de agua antes del cauce de alivio, obtenida en Hec-Ras.....72

Tabla 11. Variación entre los niveles antes y después del cauce de alivio dividida por el calado de agua antes del cauce de alivio, obtenida en Iber.72

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio

Tabla 12. Combinaciones de caudales utilizadas en el estudio de las diferencias de velocidad y niveles de agua en la interfase entre el cauce de alivio y el cauce natural del Zadorra.
.....78

Tabla 13. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 1 (original).80

Tabla 14. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 1 (caudales Iber).81

Tabla 15. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 2 (confluencia).82

Tabla 16. Resultados de la variación del ancho de la zona de frontera entre curvas límites, para los tres tipos de geometrías consideradas.	84
Tabla 17. Resultados de la variación del área de la zona de frontera entre curvas límites, para los tres tipos de modelos considerados.	85
Tabla 18. Resultados de la variación de la diferencia entre las curvas límites de Hec-Ras con Iber, para los tres tipos de modelos considerados.	85
Tabla 19. Combinaciones de caudales que se utilizan para calcular la posición óptima de la interfase, así como para verificar la validez de esta posición para caudales mayores.	88
Tabla 20. Resumen de los resultados obtenidos con la optimización de la ubicación de la interfase de la sección 218 para los casos de estudio definidos.	89
Tabla 21. Resumen de los resultados obtenidos con la optimización de la ubicación de la interfase de la sección 282 para los casos de estudio definidos.	90
Tabla 22. Resumen de los resultados obtenidos con la posición original de la interfase de la sección 282 para los casos de estudio definidos.	91
Tabla 23. Comparación de la distribución de velocidades de los modelos Hec-Ras e Iber, para la sección 218 bajo unos caudales de 30 m ³ /s en el Zadorra y 20 m ³ /s en el Alegría.	93
Tabla 24. Comparación de la distribución de velocidades de los modelos Hec-Ras e Iber, para la sección 282 bajo unos caudales de 80 m ³ /s en el Zadorra y 70 m ³ /s en el Alegría.	94

1. Introducción

El presente proyecto consiste en el estudio de una zona de flujo compleja mediante los modelos hidráulicos que se han enseñado a lo largo de la formación de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos: Hec-Ras como modelo unidimensional, e Iber como modelo bidimensional.

El estudio abarcará la caracterización de un sistema fluvial compuesto por un río principal (el río Zadorra), su cauce de alivio artificial, y la desembocadura de uno de sus principales afluentes (el río Alegría), todo esto en una extensión de aproximadamente 1.5 km dónde el río discurre por parte de la periferia norte del núcleo urbano de Vitoria. Dentro de la caracterización del flujo en esta zona, se centra la atención especialmente en el cauce de alivio y el azud de derivación que permite su funcionamiento, al ser una obra de defensa contra inundaciones relativamente reciente.

De forma paralela a la caracterización del sistema fluvial, se estudiarán las diferencias en los resultados proporcionados por ambos modelos de cálculo, así como sus limitaciones al tratar con una zona de flujo compleja como es la del Zadorra en su confluencia con el Alegría. Este estudio de las limitaciones de los modelos es especialmente interesante en el caso del modelo unidimensional dada la notable componente bidimensional de la zona, con dos ramales del río discurrendo casi en paralela y con un alto grado de interacción entre ellos.

1.1. Ubicación del estudio y toponimia

El estudio se centra en el río Zadorra a su paso por la ciudad de Vitoria-Gasteiz (abreviado como Vitoria en futuras referencias), capital de la provincia de Álava y de la comunidad autónoma del País Vasco, España. Aunque la extensión de la zona de estudio es relativamente pequeña (una pequeña parte en la periferia nordeste de la ciudad), con frecuencia a lo largo del estudio se encontrarán referencias a topónimos que quedan fuera de ella. Con el espíritu de ubicar cada uno de estos topónimos, a continuación se presentan primero un esquema de la zona de estudio y luego una ortofoto a página completa del curso del Zadorra a su paso por Vitoria.



Figura 1. Esquema del sistema fluvial que se pretende caracterizar en este estudio. Se indica la nomenclatura utilizada para los principales componentes de la zona de estudio.

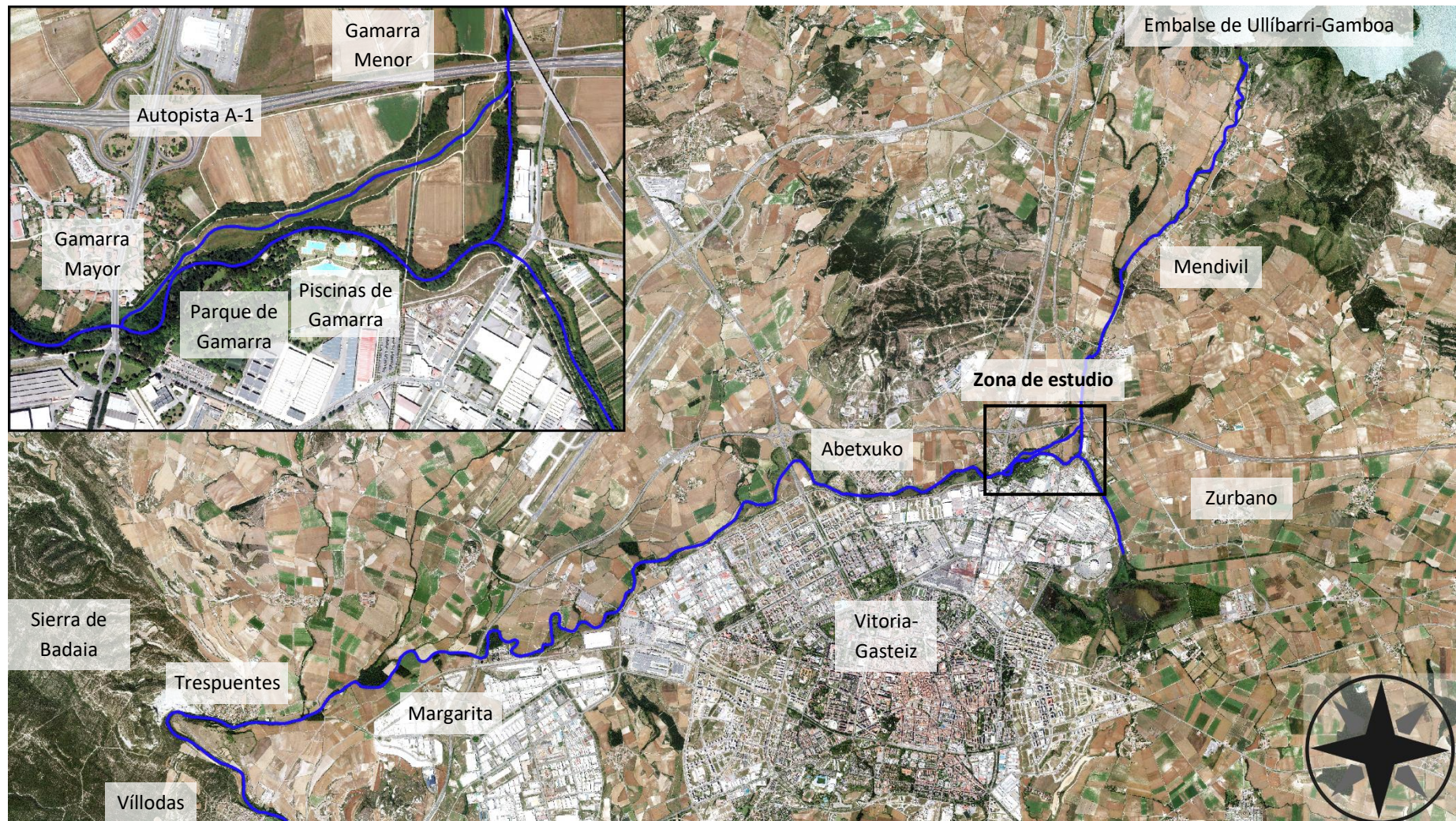


Figura 2. Ortofoto del curso del Zadorra y Alegría (indicados en azul) a su paso por la Llanada Alavesa y la ciudad de Vitoria, sobre la que se marcan los diferentes topónimos utilizados en el estudio.

1.2. Antecedentes

Durante un periodo de 10 meses, desde mitades de marzo de 2016 hasta enero de 2017, el autor y el tutor del presente proyecto colaboraron en un proyecto encargado por la Agencia Vasca del Agua (URA) para estudiar el efecto de posibles dragados y tratamientos de vegetación en la inundabilidad del Zadorra a su paso por Vitoria. Este estudio tenía su origen en las demandas de los agricultores hacia las administraciones hidráulicas para aumentar la capacidad hidráulica de los cauces y así reducir los daños producidos por las inundaciones. En él se analizaban tanto los efectos que tenían las actuaciones planteadas por la población ribereña (los dragados y tratamientos de vegetación) así como su vida útil, con el objetivo de analizar la sostenibilidad a lo largo del tiempo de estas actuaciones.

En el marco de la realización de este proyecto, se adquirió un gran conocimiento del entorno del río, ya fuera por observaciones presenciales o por la manipulación de información en gabinete. A continuación se detallan las diferentes visitas hechas con el objetivo de ganar un mayor conocimiento del Zadorra, su historia y su entorno:

- 17 de marzo de 2016, Vitoria. Primera toma de contacto con todo el dominio del Zadorra, desde la presa de Ullíbarri hasta el azud de Trespuentes. En esta visita no se visitó el río Alegría.
- 14 al 17 de junio de 2016, Vitoria. Se visitaron todos los puentes del área de estudio, incluidos los puentes del Alegría. También se visitó el Archivo del Territorio Histórico de Álava para buscar información de antiguos proyectos ejecutados en el cauce del río.
- 27 de junio de 2016, Zaragoza. Visita a los archivos de la Confederación Hidrográfica del Ebro, con el mismo objetivo de recopilar información de antiguos proyectos ejecutados en el cauce del río.
- 12 y 13 de septiembre de 2016, Vitoria. Última visita al río, en que se efectuaron una serie de catas con el objeto de tomar muestras granulométricas de material aluvial en su lecho.

Algunos de los resultados o fuentes de información de este primer proyecto para URA se aprovechan para el presente estudio, como se indica más adelante en el apartado 1.4.

1.3. Motivación y objetivo del estudio

Durante el desarrollo del anterior estudio realizado para URA se destacó la zona formada por el Zadorra, su cauce de alivio y la confluencia con el Alegría como una posible zona a investigar con el modelo bidimensional entregado por URA, dado el alto componente bidimensional que se intuía que tenía este sistema fluvial. En su momento se descartó esta línea de estudio al alejarse de los objetivos que URA había marcado para aquel trabajo. Ahora, una vez se está en el marco de un nuevo estudio no supeditado al análisis de ningún aspecto específico del río, se puede retomar esa idea original de estudiar el carácter bidimensional de la zona del cauce de alivio del Zadorra y la confluencia con el Alegría.

La intuición de que el sistema fluvial presenta un carácter bidimensional se basa en dos aspectos:

- 1) La disposición casi paralela del cauce de alivio respecto al cauce original del Zadorra. En el tramo más aguas abajo del cauce de alivio se puede observar cómo ambos ramales apenas están separados por unos pocos metros, y por lo tanto se espera que sus aguas puedan interaccionar para episodios de aguas altas del río.
- 2) La confluencia del Alegría con el Zadorra. El hecho de que ambos ríos se aproximen a la confluencia con la misma dirección pero sentidos opuestos (el Zadorra discurre de norte a sur, mientras que el Alegría lo hace de sur a norte) hace pensar que en esta confluencia se puedan agravar los típicos problemas que se suceden en la desembocadura de un afluente en su río principal:
 - Para el afluente, se produce un cambio brusco en la dirección al incorporarse al río principal. Este cambio brusco provoca un frenado de sus aguas.
 - Para el río principal, la incorporación de la corriente del afluente con una dirección diferente a la suya propia plantea una dificultad a su flujo.

Por lo tanto, se espera que para caudales elevados del Alegría éste suponga un obstáculo al flujo del Zadorra. Esto podría acabar ralentizando el curso de agua por el Zadorra, e incluso obligarle a que desagüe más agua por el cauce de alivio para compensar las dificultades al flujo impuestas por el Alegría.

De confirmarse este aspecto bidimensional de la zona de estudio, se considera de interés comparar el rendimiento del modelo unidimensional con el del bidimensional. El modelo unidimensional (en este caso Hec-Ras) se usa en abundancia gracias a su rapidez al realizar el cálculo. Sin embargo, no siempre se presta atención a la validez de sus resultados. Por otra parte, el modelo bidimensional (en este caso Iber) requiere un mayor esfuerzo y tiempo computacional, que compensa con una mayor precisión al describir el flujo de agua. Comparando estos dos modelos se pretende observar hasta qué punto Hec-Ras está capacitado para describir zonas con marcado carácter bidimensional.

Por otro lado, en el Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de 2015 elaborado por la CHE se incluyen una serie de potenciales nuevos cauce de alivio como propuestas de obras de protección en el Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) de Vitoria. Se considera que el estudio del cauce de alivio que ya está en funcionamiento así como la detección de las limitaciones de los modelos hidráulicos podría ser útil para dimensionar y predecir el comportamiento de estos hipotéticos cauces de alivio.

Después de exponer las motivaciones detrás de la elección del tema del estudio, se resumen brevemente los objetivos que se esperan haber alcanzado una vez se haya finalizado:

- Caracterización del flujo en la zona en que el Zadorra se bifurca en su cauce de alivio y cauce original y en que recibe la aportación del Alegría. ¿Es bidimensional el flujo que se produce en esta zona?

- Caracterización del rendimiento del cauce de alivio en cuánto a alejar parte del flujo del Zadorra de la periferia norte de la ciudad. ¿Es suficiente para reducir la peligrosidad de inundaciones del núcleo urbano ubicado en la llanura izquierda del río?
- Comparación del rendimiento de los modelos de cálculo utilizados, e identificación de las limitaciones que presentan al describir una zona de flujo bidimensional.

1.4. Fuentes de información

Para el desarrollo de este estudio, se han aprovechado conocimiento y archivos del anterior proyecto realizado para URA. A continuación se listan las principales fuentes de información con las que se parte al inicio del desarrollo de este estudio, así como la información que se consulta de cada una de ellas:

- Estudio UPC 2017. Se aprovecha uno de los principales resultados obtenidos del estudio realizado para URA, que es un mapa de rugosidades calibradas con datos de las diversas estaciones de aforo del río para los últimos episodios de crecida registrados en la zona. De forma adicional, a lo largo de la redacción del anterior estudio se adquirió una serie de información intangible del río, ya sea gracias a las aportaciones del personal de URA que supervisó el estudio o de primera mano tras los diversos reconocimientos en campo que se realizaron del río y sus afluentes. Entre esta información podría incluirse la historia reciente del río, impresiones acerca del estado de su cauce o el aspecto de la zona en que el Zadorra se bifurca en su cauce original y el cauce de alivio. También se aprovecha el material fotográfico generado en el desarrollo del estudio para URA.
- Agencia Vasca del Agua (URA). En su momento, URA proporcionó un Modelo Digital de elevaciones con información detallada de Ríos (MDR) para poder conocer la topografía precisa de la zona de estudio. Esta información ha sido de especial relevancia, ya que este MDR no se ha sabido encontrar en GeoEuskadi (portal de información geográfica del País Vasco), y por tanto no se hubiera podido utilizar en el desarrollo de este estudio. URA también proporcionó en su momento los modelos unidimensional (en Hec-Ras) y bidimensional (en Iber) que utilizan en la agencia para caracterizar el funcionamiento del Zadorra y sus afluentes.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). A través de su Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) se pueden consultar datos de las estaciones de aforo de los ríos de la cuenca del Ebro, en la que se incluye el Zadorra. También se ha consultado documentación de la CHE relacionada con el Zadorra y su cuenca hidrográfica.
- GeoEuskadi. A través de su servicio de descarga FTP se ha podido obtener toda una serie de ortofotos del río y su entorno que han servido para poder describir su evolución en los últimos años.

También se solicitó a URA y la CHE el proyecto o estudio del cauce de alivio artificial con el objetivo de poder comparar los resultados que se obtendrán en este estudio con los proyectados por las administraciones hidráulicas en su momento. Por desgracia, no se pudo recibir esta información dentro del plazo de redacción de este estudio, y por lo tanto se ha descartado incluir una valoración de la bondad del proyecto original.

2. Descripción del río y la zona de estudio

El Zadorra nace al este de Álava en el término municipal de Munain y desemboca en el río Ebro entre los límites municipales de Miranda de Ebro (Burgos) y Zambrana (Álava). En su tramo final, el Zadorra actúa como frontera natural entre las comunidades autónomas de Castilla y León y el País Vasco. En la Figura 3 se puede observar la ubicación de la cuenca hidrográfica del Zadorra dentro de la cuenca hidrográfica del Ebro.

El Zadorra tiene una extensión de 88 km en que discurre principalmente a lo largo de la provincia de Álava, atravesando también el Condado de Treviño (provincia de Burgos). La superficie de su cuenca hidrográfica es de 1357 km², que representa poco más de un 1.5% de la superficie total de la cuenca hidrográfica del Ebro (85569 km²). El Zadorra dispone de una serie de afluentes, entre los que destacan el río Santa Engracia, el Alegría, el Zaya y el Ayuda. En la Tabla 1 se presentan una serie de datos básicos de longitud y área de cuenca de cada uno de estos afluentes, y en la Figura 4 su ubicación dentro de la cuenca hidrográfica del Zadorra.

Río	Zadorra	Santa Engracia	Alegría	Zaya	Ayuda
Afluente de	Ebro	Zadorra	Zadorra	Zadorra	Zadorra
Regulado	Sí	Sí	No	No	No
Longitud (km)	88	26.8	15	26.8	43.8
Cuenca (km ²)	1357	181	120	90	310

Tabla 1. Principales características del Zadorra y sus principales afluentes.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

Por sus diferentes características, el Zadorra se puede dividir en tres tramos:

- 1) El primero abarca desde su nacimiento hasta el embalse de Ullívarri-Gamboa.
- 2) El segundo abarca la llamada “Llanada Alavesa”, una extensa llanura donde se sitúa la ciudad de Vitoria. En este tramo desembocan los ríos Santa Engracia, Alegría y Zaya.
- 3) El tercer y último tramo se inicia poco antes de la localidad de Trespuentes, donde se adentra en la Sierra de Badaia, y finaliza con su desembocadura en el mismo Ebro. En este tramo desemboca el río Ayuda.

En el proyecto que se realizó para URA, se estudió únicamente el segundo tramo del Zadorra. Al estar el presente estudio basado en el que se realizó para URA, también se estudia únicamente el Zadorra en su tramo de la Llanada Alavesa, aunque en una extensión más reducida: sólo se abarca la confluencia del Alegría con el Zadorra, junto con el cauce de alivio auxiliar del que dispone el Zadorra en la misma zona.

A continuación se describen con mayor precisión aquellos elementos del Zadorra que son de mayor interés para el área de estudio considerada:

- Cauces que confluyen y forman el sistema fluvial compuesto por el cauce natural del Zadorra, el cauce de alivio artificial y la desembocadura del Alegría.
- Intervenciones antrópicas realizadas en los elementos de dicho sistema fluvial.
- Régimen hidrológico y grandes crecidas registradas en los últimos años.

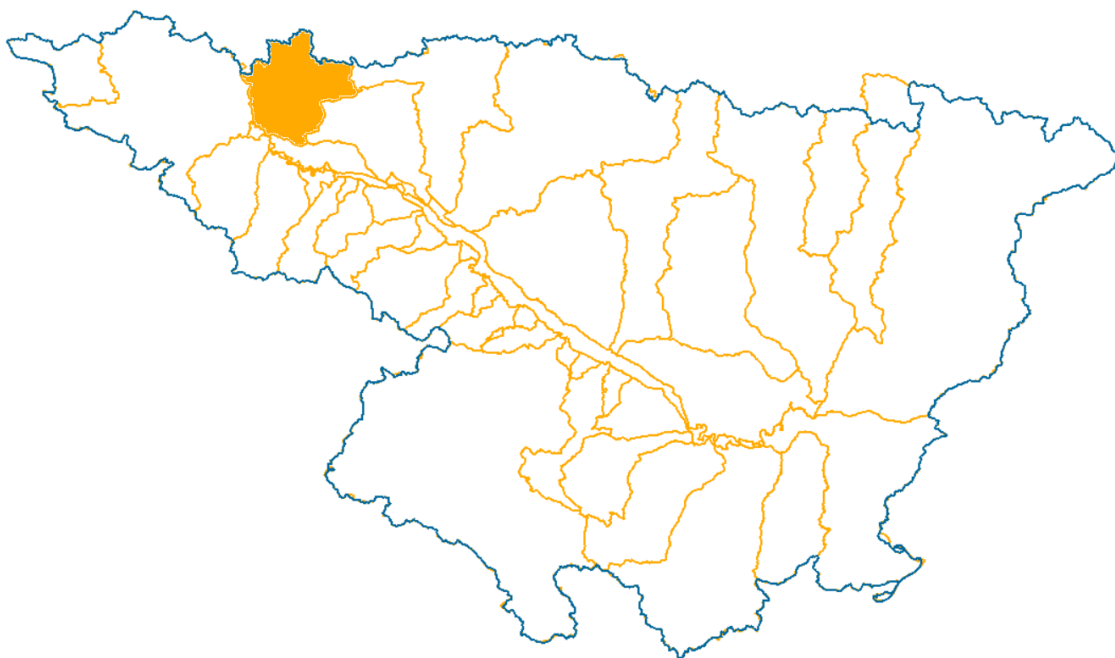


Figura 3. Ubicación de la cuenca hidrográfica del Zadorra (junto con la de los ríos Bayas e Inglares) dentro del conjunto de la cuenca hidrográfica del Ebro.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

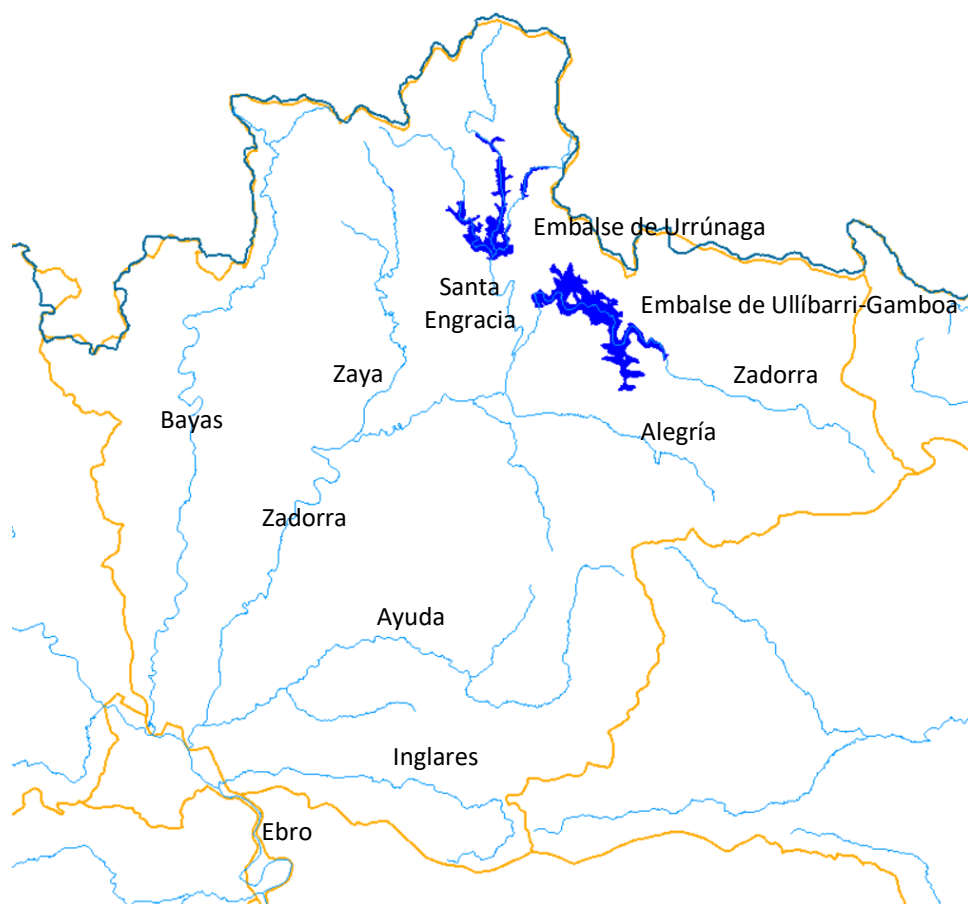


Figura 4. Esquema de la cuenca hidrográfica del Zadorra, Bayas e Inglares, sobre el que se indican los principales afluentes y embalses del sistema fluvial del Zadorra.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

2.1. Los cauces del sistema fluvial Zadorra, cauce de alivio y Alegría

Ubicado dentro del segundo tramo del Zadorra, la zona de estudio está formada por varios cauces con diferentes características cada uno. A continuación se describen brevemente estos diferentes cauces:

2.1.1. Zadorra, entre la presa de Ullívarri-Gamboa y el azud de derivación del cauce de alivio.

El cauce del Zadorra entre la presa y el azud de derivación presenta un curso ligeramente o poco sinuoso, con meandros de muy poca amplitud en la zona más cercana al embalse y cursos más rectos en la zona más cercana al azud de derivación. Su caudal viene regulado por la presa de Ullívarri-Gamboa.

La longitud de este tramo es de poco más de 6 km, con una pendiente media del 0.17%. En este tramo el río tiene una anchura de alrededor de 20 metros. Con esta anchura, es habitual que gran parte del cauce esté cubierto por las copas de los árboles de sus márgenes, con lo que no se favorece el crecimiento de vegetación en el lecho del río ante la falta de luz solar.

2.1.2. Zadorra, aguas abajo del azud de derivación

Aguas abajo del azud de derivación, el Zadorra adopta un carácter de río de llanura, más sinuoso y con meandros más amplios que los que se observan aguas arriba del azud.

La longitud de este tramo, desde el azud de derivación hasta el encajonamiento del Zadorra a la altura de Trespuentes, es de unos 16 km, con una pendiente media del 0.08%. Tal como se puede observar, esta pendiente es inferior a la del tramo inmediatamente aguas arriba. En este tramo, el río gana ligeramente en anchura, que en general se sitúa entre los 20 y los 30 metros.

En el anterior estudio para URA se analizó mediante una serie de catas y observaciones de campo las características del lecho de este tramo. En su momento se observó que en una gran cantidad de los puntos estudiados (6 de 9) el lecho del río era rocoso. En 2 de los otros puntos sí que se podían apreciar depósitos aluviales, aunque en los márgenes del río y no en su lecho propiamente dicho, pudiendo indicar que los puntos en los que se tomaron las catas fueron en su día parte del cauce originario del Zadorra. En la Figura 5 se indica la ubicación de los puntos en que se tomaron muestras del lecho del río.



Figura 5. Ubicación de las observaciones y tomas de muestras realizadas para determinar la naturaleza del lecho del Zadorra.

En verde se muestran los puntos donde se encontraron depósitos aluviales, y en rojo los puntos donde se observó un lecho rocoso. La imagen del fondo es la ortofoto del 1956/57. Fuente: UPC, 2017.

2.1.3. Cauce de alivio del Zadorra

Este cauce tiene una longitud de poco más de 1 km, con una pendiente del 0.16%, ligeramente superior a la del cauce natural del Zadorra ya que salva el mismo desnivel en una menor distancia (el Zadorra cubre el mismo desnivel a lo largo de poco más de 1.5 km, lo que supone una pendiente del 0.12%).

Este cauce tiene una anchura de aproximadamente unos 20 metros con un lecho cubierto de vegetación herbácea y márgenes de pendiente muy reducida, tal como se puede apreciar en la Figura 6. La vegetación se somete a un meticuloso mantenimiento para preservar la capacidad de desagüe de este cauce.



Figura 6. Imagen del cauce de alivio seco en medio del periodo de aguas bajas del Zadorra. Se puede apreciar la vegetación que cubre el lecho del cauce. Fotografía tomada el 14 de junio de 2016.

2.1.4. Desembocadura del Alegría

En su tramo final el Alegría es un río encauzado, con aproximadamente unos 40 metros de ancho y una pendiente del 0.12% a su paso por Vitoria. Su lecho está dominado casi en su totalidad por vegetación, tal como se puede observar en la Figura 7.



Figura 7. Fotografía del cauce del Alegría en su último puente antes de su confluencia con el Zadorra. En ella se puede observar como la vegetación se ha adueñado de todo el ancho del cauce a excepción del pequeño hilo de agua (al fondo de la imagen) por donde discurre regularmente el río. Fotografía tomada el 17 de junio de 2016.

2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial

Los ríos Zadorra y Alegría han sufrido una serie de intervenciones antrópicas destacables en los últimos años. Algunas de ellas son suficientemente importantes como para definir los cauces del sistema fluvial que se han presentado en el apartado 2.1 anterior, como por ejemplo la construcción de la presa de Ullívarri-Gamboa, el cauce de alivio del Zadorra o el encauzamiento del tramo final del Alegría. Otras de estas obras tienen un impacto más local, cómo los diversos puentes que salvan los ríos o los azudes que se encuentran en su cauce.

A continuación se exponen las intervenciones más importantes que se han realizado sobre los ríos de la zona de estudio. En la Figura 17 se resumen todas ellas sobre un mapa de la zona de estudio.

2.2.1. Presa de Ullívarri-Gamboa

La construcción de la presa de Ullívarri-Gamboa marcó un antes y un después en las dinámicas del río Zadorra y su relación con su entorno. Completada el año 1957, la presa tenía, y mantiene hoy en día, la función principal de abastecimiento de agua a las regiones urbanas de Vitoria y el Gran Bilbao (en la actualidad estas dos regiones representan aproximadamente un millón de usuarios domésticos, además de otros usos que puedan tener estas regiones, como por ejemplo el industrial). A pesar de esta función primaria de abastecimiento, la presa es capaz de laminar episodios de crecida ordinarios del Zadorra, si bien no está pensada para laminar episodios extraordinarios. Esto se debe a que para garantizar el abastecimiento de agua es necesario que el embalse conserve una cota de agua elevada, dejando poco margen para laminar las aportaciones de agua que le lleguen.

A nivel de impacto sobre el Zadorra, la presa ha comportado dos grandes cambios:

- 1) Actúa como barrera en el transporte de sedimentos desde la cabecera del Zadorra.
- 2) La laminación de los episodios de crecida ordinarios ha reducido la frecuencia de las inundaciones en sus llanuras de inundación aguas abajo, creando una falsa sensación de seguridad a los usuarios de estas llanuras.

De estos cambios, el segundo es el que tiene un mayor impacto sobre el uso que se le da al río. Fruto de la falsa sensación de seguridad, se han acercado diversos usos del suelo al límite mismo del cauce, agotando el espacio sobre las llanuras. En la Llanada Alavesa, esto se ha traducido en una mayor presión agrícola en el margen derecho del río y una mayor presión urbanística sobre el margen izquierdo. Como la presa sólo es capaz de laminar episodios ordinarios de crecidas, los episodios extraordinarios son más devastadores en la actualidad que antaño. Esto se debe al aumento de la vulnerabilidad que provoca el acercamiento de los distintos usos de las llanuras a los márgenes del río.

Este aumento de la vulnerabilidad ha supuesto que se hayan de plantear actuaciones para paliar las inundaciones a lo largo del río. Entre estas actuaciones de defensa ante inundaciones, se enmarcan las obras de construcción del cauce de alivio artificial del Zadorra o el encauzamiento del Alegría.

2. Descripción del río y la zona de estudio

2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial



Figura 8. Fotografía de la presa de Ullívarri-Gamboa.
Fotografía tomada el 17 de marzo de 2016.



Figura 9. Ortofoto de la zona de estudio del vuelo americano de los años 1945/46, previa a la construcción de la presa de Ullívarri-Gamboa y del encauzamiento del Alegría.
Se puede observar cómo en un primer momento los usos del suelo cercanos al río eran agrícolas y la urbanización de la ciudad quedaba muy lejos de los márgenes del río. La ortofoto de los años 1956/57 presenta unos usos del suelo idénticos a los de ésta. Fuente: GeoEuskadi.

2. Descripción del río y la zona de estudio

2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial



Figura 10. Ortofoto de la zona de estudio del año 1984, posterior tanto a la construcción de la presa de Ullíbarri-Gamboa como al encauzamiento del Alegría.

Respecto a la ortofoto anterior, se puede observar la expansión de la ciudad hacia los márgenes izquierdos tanto del Zadorra como del Alegría. Este acercamiento de la ciudad a los márgenes del río se traduce en un aumento de su exposición a episodios de inundaciones. Fuente: GeoEuskadi.



Figura 11. Ortofoto del año 2016 de la zona de estudio.

Se puede observar cómo se ha intensificado la presión urbanística sobre los márgenes respecto a la anterior ortofoto. Aun así, se puede observar cómo se mantiene un espacio libre de edificaciones entre el río Zadorra y la ciudad: esto no sucede así con el río Alegría. Fuente: GeoEuskadi.

2.2.2. Cauce de alivio en Gamarra Menor

Con el objetivo de luchar contra el aumento de la vulnerabilidad ante los episodios de inundación¹, desde la Agencia Vasca del Agua URA y el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz se estudiaron la implementación por fases de un conjunto de obras de defensa estructurales a lo largo del Zadorra. La primera fase de este conjunto de obras consistía en la construcción de un cauce de alivio artificial que desdoblara el Zadorra entre el puente de la autovía A-1 y el puente de Gamarra Mayor. La construcción de esta obra se inició y finalizó en el año 2004.

El cauce de alivio se asienta sobre unos antiguos campos de cultivo, tal como se puede ver en la Figura 13. El cauce es ancho y presenta unos márgenes con poca pendiente, lo que proporciona una mayor sección hidráulica por donde conducir las aguas del Zadorra. Su lecho está cubierto de vegetación: esta vegetación puede ser una medida efectiva y económica para proteger el cauce ante erosión, pero a la vez exigirá planes de mantenimiento para garantizar su correcto funcionamiento. Si se descuidase este aspecto, el cauce de alivio podría perder capacidad hidráulica debido a las mayores rugosidades de la vegetación.

Con el objetivo de desviar parte del caudal del Zadorra de su cauce natural al cauce de alivio se instala un azud de derivación. Este azud presenta una obertura en su sección central, para facilitar el paso de las aguas del Zadorra para episodios de poco caudal. A medida que aumenta el caudal aportado por el Zadorra, la posición del azud (oblicuo respecto a la dirección del río) favorece el flujo de agua hacia el cauce de alivio. De esta manera se reduce progresivamente el caudal de agua que circula próximo a la periferia nordeste de la ciudad, pudiendo inundarla.



Figura 12. Fotografía del azud de derivación del cauce de alivio del Zadorra. En ella se puede observar su geometría, con una abertura en el centro de su sección. Fotografía tomada el 17 de marzo de 2016.

¹ En un anejo a la memoria del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación presentado en el año 2015 por la CHE, se señala a Vitoria-Gasteiz como una de las ARPSIs (Área con Riesgo Potencial Significativo de Inundación) con mayor riesgo por inundación del País Vasco. En este informe se estima la población en riesgo en 224 hab/año y los daños medios esperados en 5.1M€ anuales.

2. Descripción del río y la zona de estudio
2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial



Figura 13. Ortofoto del año 2002. Detalle de la zona de estudio previa a la construcción del cauce de alivio.

Fuente: GeoEuskadi.



Figura 14. Ortofoto del año 2005. Detalle de la zona de estudio inmediatamente después de la puesta en funcionamiento del cauce de alivio.

Fuente: GeoEuskadi.

2.2.3. Canalización del Alegría en su tramo final

Tal como se puede observar de la comparación entre la Figura 9 y la Figura 10, el tramo final del Alegría es un cauce canalizado, construido en medio de los antiguos campos de cultivo que formaban parte de las llanuras de inundación de su cauce original. El encauzamiento del Alegría responde a razones de defensa ante inundaciones: el nuevo trazado se alejaba del municipio de Zurbano, al este de Vitoria, y en la propia capital vasca se le dotó de una gran capacidad hidráulica.

La gran capacidad hidráulica en el tramo final a su paso por Vitoria estaba pensada para laminar el flujo de agua del río. Para ello se dotó de un ancho extraordinario al cauce, excesivo para el flujo de agua ordinario del Alegría. Este ancho excesivo ha provocado que el propio cauce se haya visto invadido por una densa vegetación, ya que no se dan episodios que puedan arrastrar la vegetación con suficiente regularidad como para mantener el cauce despejado: de esta manera, el cauce pierde capacidad hidráulica debido a las grandes obstrucciones que supone la densa vegetación. El problema de la vegetación se ejemplifica en las fotografías de la Figura 7 y de la Figura 15, en las que se muestran las inmediaciones de los dos puentes con los que cuenta el Alegría en su tramo final por Vitoria.



Figura 15. Fotografía del puente de la carretera que va a Zurbano, en que se aprecia la extensa vegetación que puebla el cauce encauzado del tramo final del Alegría.
Fotografía tomada el 17 de junio de 2016.

2.2.4. Azudes

A lo largo del Zadorra se pueden observar la presencia de diversos azudes en su cauce. La mayoría de ellos tenían una función de captación de agua para proporcionar energía hidráulica con la que operar pequeños molinos. Otros también tienen la función de captar agua para otros usos, como pueden ser el uso industrial o el de suministro de agua a la población de Vitoria.

En la zona de estudio, se localizan sólo dos azudes. El primero es el azud de derivación mostrado en la Figura 12, y que por tanto juega un papel importante en la defensa contra inundaciones de la periferia nordeste de la ciudad.

El segundo azud se encuentra también en el cauce del Zadorra, a su paso por el parque de Gamarra, y servía un propósito lúdico-recreativo: se compone de una serie de pilas, que servían como soporte para cerrar el río y de esta manera habilitar una zona de baño en el propio río. Hoy en día la función de espacio de baño ya se cubre con las piscinas exteriores del parque de Gamarra, y por tanto el azud se ha quedado sin uso.



Figura 16. Vista desde el puente de Gamarra de las pilas del azud de la antigua piscina fluvial del Zadorra.

Fotografía tomada el 17 de marzo de 2016.

2.2.5. Puentes

Por último, a lo largo del Zadorra y Alegría se suceden toda una serie de puentes con los que salvar el obstáculo que supone el paso del agua. En el tramo de la Llanada Alavesa se pueden encontrar dos tipos de puentes diferentes, en función de su obstrucción al flujo:

- 1) Puentes de obstrucción al flujo moderada. En general son puentes históricos, con numerosos pilares de anchura considerable y ojos rematados con arcos de medio punto. Con esta geometría, se pierde ancho de flujo efectivo a medida que sube el nivel del agua, exponiendo al puente a que entre antes en carga. El menor espaciado entre pilares convierte los ojos de estos puentes en posibles puntos de acumulación de obstáculos al poder atascarse troncos u otros elementos de vegetación.
- 2) Puentes de obstrucción al flujo pequeña. En general son puentes más modernos, con pocos pilares estrechos en el cauce y tableros rectos (los ojos de los puentes son rectangulares). Estos puentes garantizan, con una misma cota de coronación, una mayor capacidad hidráulica que los anteriores.

Dentro de la zona de estudio se pueden localizar dos puentes peatonales que permiten conectar las piscinas de Gamarra en el margen izquierdo con el pueblo de Gamarra Menor en el margen derecho. En los límites de la zona de estudio se ubican otros 3 puentes, destacando entre ellos el puente de Gamarra por sus mayores dimensiones y obstáculo al flujo (es un claro ejemplo de

2. Descripción del río y la zona de estudio
2.2. Intervenciones antrópicas y evolución del sistema fluvial

un puente de obstrucción al flujo moderada, con varios pilares gruesos y ojos con arco de medio punto).



Figura 17. Figura basada en la ortofoto del año 2016 en la que se indican la ubicación (o extensión) de las intervenciones realizadas en los cauces y llanuras de Zadorra y Alegre en la zona de estudio. Los círculos indican azudes en el cauce, y los triángulos puentes (de mayor obstrucción los de color más intenso).

2.3. Régimen hidrológico del Zadorra

Por último se estudia el régimen hidrológico del Zadorra, a partir de los datos de las últimas crecidas registradas así como de los caudales asignados por URA para diferentes periodos de retorno. De esta manera, se pueden poner en contexto los valores que se utilizarán más adelante para estudiar el comportamiento del azud de derivación y del cauce de alivio. Ambas informaciones se aprovechan del estudio presentado para URA.

2.3.1. Los episodios de crecida de los últimos años

A partir de la información disponible de las estaciones de aforo, se cruzaron los máximos diarios de caudal y calado de los últimos años con artículos de diarios locales sobre inundaciones en la Llanada Alavesa. De esta manera, se lograron identificar una serie de 7 episodios de inundación en el periodo estudiado. Este periodo se extiende desde mayo de 2012, año en que se registran los primeros datos de caudal en el Alegría y en el Zadorra, hasta setiembre de 2016, momento en que se cerró el estudio de avenidas en el marco del trabajo que se realizaba para URA. Los siete episodios identificados, junto con algunas de las mediciones tomadas en las estaciones de aforo del Zadorra, se muestran en la Tabla 2.

Fecha	Caudal máximo Abetxuko (m^3/s)	Calado máximo en Mendivil (m)
Aguas bajas	2.29	0.32
19 de enero de 2013	130.8	3.32
8 de febrero de 2013	123.12	3.35
4 de marzo de 2014	Sin datos	2.83
31 de enero de 2015	131.12	3.32
25 de febrero de 2015	118.08	3.18
28 de febrero de 2016	119.42	2.6*
10 de marzo de 2016	106.56	2.4*

Tabla 2. Episodios de inundación de la Llanada Alavesa en el periodo mayo 2012-setiembre 2016.

Los valores de referencia de aguas bajas se obtienen con la media de los episodios que no son de crecida. La localización de las estaciones de aforo se indica en la Figura 25. *Estos valores de calados fueron medidos después de un cambio de localización de la estación de aforo de Mendivil. Fuente: SAIH.

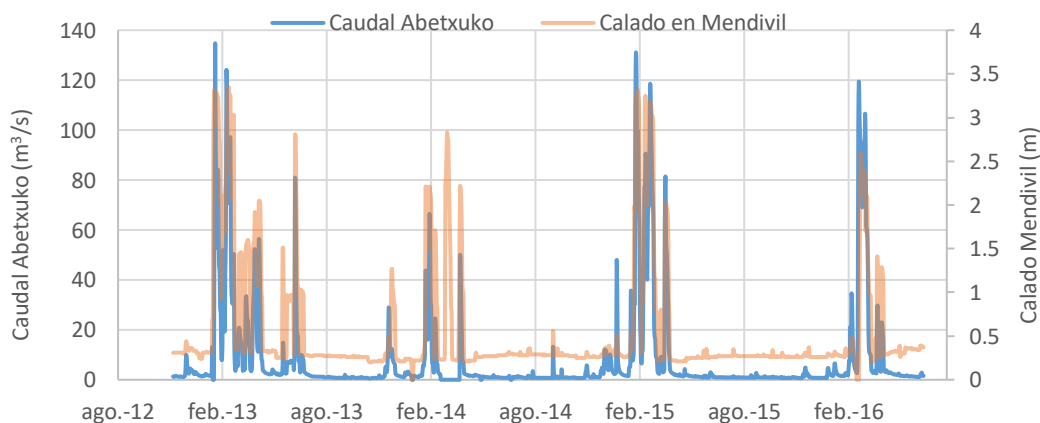


Figura 18. Representación de la evolución de los caudales en Abetxuko y calados en Mendivil que han servido para identificar los episodios de inundación del Zadorra.

Fuente: SAIH.

Fruto del cruce de los datos de las estaciones con las noticias locales, se pueden sacar una serie de conclusiones:

- El Zadorra inunda la Llanada Alavesa para caudales superiores a los 100 m³/s en la estación de aforo de Abetxuko, pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia con el Alegría.
- Los calados de la estación de aforo de Mendivil también pueden ser buenos indicadores de episodios de inundaciones aguas abajo: aun así, hay casos como el episodio del 10 de junio de 2013 en que un valor alto en Mendivil no se corresponde con un episodio de inundación. Por lo tanto, el criterio que prevalece es el de los 100 m³/s en Abetxuko.
- El comportamiento del río es estacional: En invierno (mediados enero- finales de marzo) el río lleva más caudal (aguas altas) y por tanto es cuando se producen los episodios de inundación. Fuera del periodo de aguas altas el caudal que lleva el río es mínimo (aguas bajas).

El comportamiento hidrológico del río depende mayoritariamente de la presa de Ullívarri y su régimen de explotación. Este régimen de explotación depende principalmente de la curva de garantía con la que se opera el embalse, pero también de la meteorología, que es la que acaba condicionando el aporte de agua al embalse. Para hacerse una idea de estos dos parámetros, en la Figura 19 se presentan tanto el volumen de agua mensual medio almacenado en el embalse (que depende de la curva de garantía) como las precipitaciones mensuales medias registradas en la zona. A partir de los datos de volumen de agua almacenada se puede corroborar que la curva de garantías del embalse es estacional: parece ser que se permiten unos mayores niveles de agua en primavera, en previsión al balance negativo que sufre el embalse en verano² (mayor consumo y menor aportación de agua).

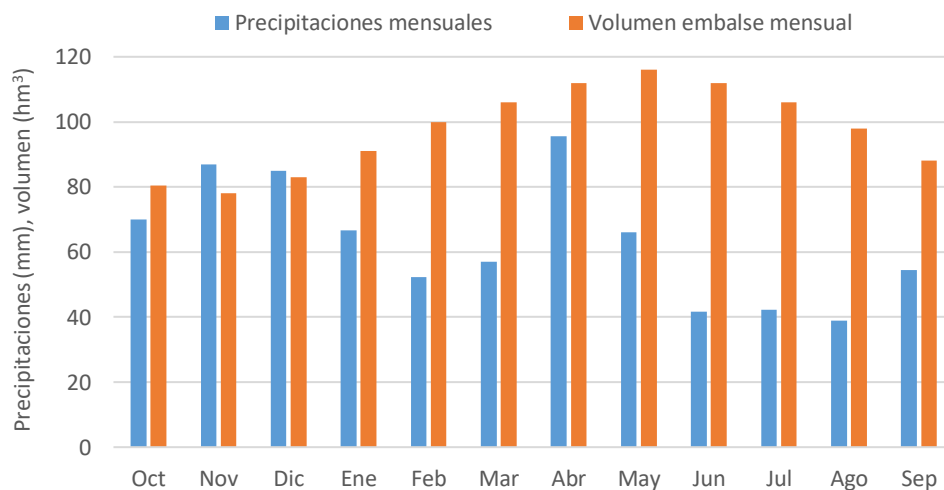


Figura 19. Precipitaciones medias mensuales registradas en el Zadorra (años 1928-2003) y volumen medio mensual embalsado en Ullívarri-Gamboa (años 1965-2004).

La escala de la izquierda vale para ambas unidades. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

² Gracias al documento de la Confederación Hidrográfica del Ebro de 2008 en que se describe el Plan Hidrológico de los ríos Bayas, Zadorra e Inglares, se conoce que la curva de garantías presenta variaciones en función del mes del año, pero no se describe cómo son estas variaciones.

2.3.2. Período de retornos y caudales asociados

En la gestión y planificación de las Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) se utilizan una serie de caudales para realizar la cartografía de peligrosidad de inundación y los cálculos del riesgo. Estos caudales se corresponden con aquellos que estadísticamente ocurren con un cierto periodo de retorno. Así pues, en la gestión y evaluación del riesgo de las zonas inundables se utilizan datos de caudales para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Como organismo encargado de la gestión del ARPSI de Vitoria, URA dispone de dichos caudales para la zona de estudio. En la Figura 20 se exponen dichos valores, extraídos del modelo Hec-Ras proporcionado por URA para el proyecto anterior.

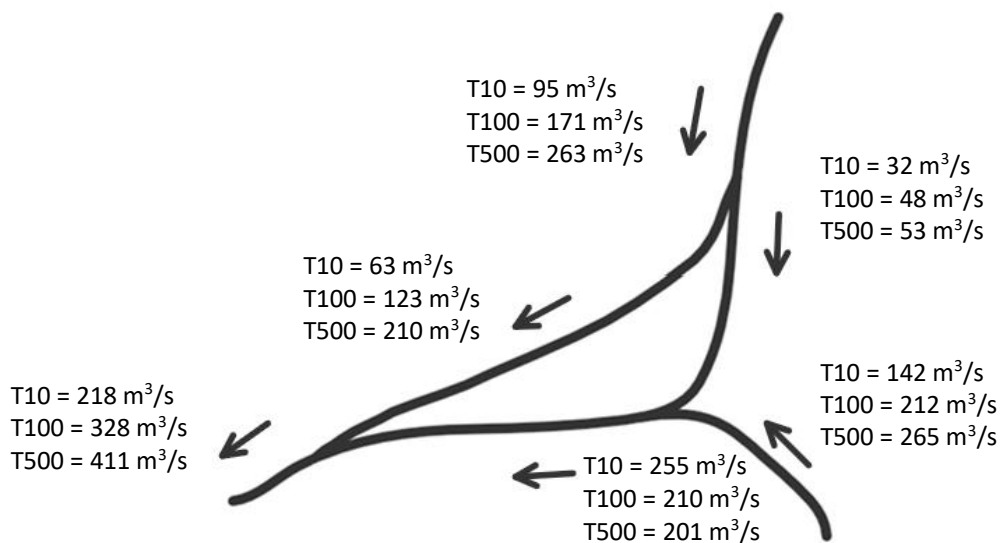


Figura 20. Valor de los caudales asignados a cada cauce de la zona de estudio para cada periodo de retorno considerado.

Fuente: URA.

Tal como se puede observar en la Figura 20, los caudales considerados por URA para un mismo periodo de retorno no cumplen la conservación de la masa a medida que se van uniendo los cauces. Esto puede deberse a que considerar la conservación de la masa para el mismo periodo de retorno implicaría que se diese el mismo periodo de retorno para las lluvias que vierten en los diferentes cauces: a medida que se sumasen las aportaciones de los diferentes cauces, se estaría asumiendo que una superficie de cada vez mayor tamaño se encontraría sufriendo un episodio igual de probable. Esta suposición parece muy atrevida, y por eso podría ser que los valores indicados no cumplen la conservación de la masa.

Aun así, hay algunos valores que parecen criticables, como por ejemplo los caudales del tramo del Zadorra una vez se le suma la aportación del Alegría: el caudal para un periodo de retorno de 10 años es superior al de 100 años, que a su vez es superior al de 500 años. Esta asignación de los caudales parece ilógica.

Otro aspecto a destacar es la diferencia de caudales esperados entre el cauce de alivio y el cauce natural del Zadorra: el cauce de alivio lleva en general un caudal aproximadamente dos (T10), tres (T100) e incluso cuatro veces mayor al del cauce natural del Zadorra (T500). Estos datos se corresponden a la acción del cauce de alivio, que descarga cada vez más agua al Zadorra para evitar la inundación de la periferia nordeste de la ciudad.

3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica

A la hora de estudiar el comportamiento del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría se utilizan programas de simulación hidráulica ante la inconveniencia de preparar un modelo físico para un estudio de estas características. Los programas que se utilizan son aquellos que se incluyen en la formación de un Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Escuela de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya (ETSECCPB, UPC): Hec-Ras, que se imparte en la asignatura de Hidráulica e Hidrología de tercer curso del Grado en Ingeniería Civil, e Iber, que se imparte en la asignatura optativa de Dinámica Fluvial del Master en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Dichos programas se presentan a continuación:

- Hec-Ras. Es un programa de análisis fluvial con capacidad de realizar análisis de flujo de agua unidimensional (en régimen permanente y no permanente), bidimensional (sólo en régimen no permanente), transporte de sedimentos y modelización de la calidad del agua. Lo desarrolla el Centro de Ingeniería Hidrológica del ejército estadounidense (*HEC, Hydrologic Engineering Center*), y actualmente es uno de los modelos de referencia en el cálculo unidimensional. Precisamente es con esta modalidad, la de análisis del flujo de agua unidimensional en régimen permanente, con la que se utiliza en el presente estudio.
- Iber. Es un programa de simulación de flujo en lámina libre con capacidad de realizar análisis de flujo de agua bidimensional, modelización de la turbulencia, cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos y modelización de la calidad del agua, entre otros. Lo desarrollan en colaboración el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña (GEAMA, UDC), el Instituto Flumen de la UPC y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Este modelo destaca por encima de otros modelos de simulación bidimensional en su facilidad al crear la malla de cálculo y visualizar resultados, gracias a su uso del modelo pre y post procesador GiD desarrollado por el CIMNE.

El uso de ambos modelos viene motivado tanto por los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria, como por su uso y experiencia por parte de URA. En el marco del estudio sobre inundaciones en el Zadorra que se hizo para URA, la agencia proporcionó una serie de modelos hidráulicos en Hec-Ras e Iber en caso que se consideraran necesarios a lo largo del desarrollo del estudio.

A continuación se describen las características de los modelos hidráulicos recibidos en su momento por URA, así como las sucesivas modificaciones realizadas tanto en el marco del anterior estudio sobre inundaciones en el Zadorra para URA como en el marco del presente estudio del comportamiento del sistema fluvial formado por el Zadorra, su cauce de alivio y la confluencia del río Alegría.

3.1. Características de los modelos hidráulicos originales entregados por URA

En el marco del estudio realizado para URA, se recibieron archivos de los modelos de Hec-Ras e Iber que la agencia utiliza para sus simulaciones del comportamiento del Zadorra y sus afluentes. A continuación se describen brevemente las características de los archivos recibidos para cada modelo.

3.1.1. Características del modelo Hec-Ras entregado

El modelo Hec-Ras recibido contenía información completa sobre diferentes aspectos del río a su paso por la llanura de Vitoria:

- Geometría del Zadorra y de todos los afluentes a su paso entre el embalse de Ullíbarri-Gamboa, al norte, y el municipio de Villodas, al sur. En la geometría proporcionada, se incluía la topografía de las secciones transversales, puentes, azudes, áreas inefectivas y diques que se pudieran encontrar a lo largo del curso del río y sus afluentes. También se incluía información de rugosidades para cada sección.
- Datos de caudales en cada afluente para los diferentes periodos de retorno que es normativo estudiar cuando se elaboran los mapas de peligrosidad y riesgo de inundaciones³ (10, 100 y 500 años de periodo de retorno). También se incluye una condición de contorno aguas abajo en Villodas, pero no una condición de contorno aguas arriba de cada afluente.

La información del modelo Hec-Ras estaba enfocada a ejecutar cálculos en régimen permanente y subcrítico. El régimen subcrítico no parece una mala suposición para un río como el Zadorra, que presenta valores de pendientes muy reducidos, inferiores a un 0.1% en la llanura de Vitoria.

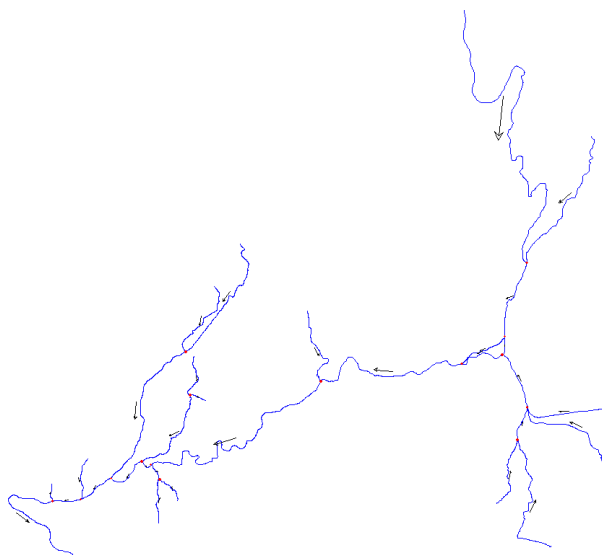


Figura 21. Esquema de la extensión de la geometría del modelo Hec-Ras original entregado por URA. Como se puede observar, se incluyen todos los afluentes del Zadorra, incluso aquellos sin apenas aportación significativa de caudal al río principal.

³ De acuerdo con la Directiva europea 2007/60/CE relativa a la evaluación y la gestión de los riesgos de inundación y el Real Decreto 903/2010 que la traspone al ordenamiento español.

3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica

3.1. Características de los modelos hidráulicos originales entregados por URA

3.1.2. Características del modelo Iber entregado

El modelo Iber recibido también disponía de información completa de la geometría y datos de caudales para el río y afluentes para cada periodo de retorno considerado (10, 100 y 500 años). En este caso la diferencia era la extensión del modelo. Ante la mayor complejidad y esfuerzo computacional que supone el modelo bidimensional, el Zadorra está dividido en 5 tramos, con un tramo adicional para describir el Alegría. Todos estos tramos se superponen ligeramente en los extremos, se supone que con el objeto de dar continuidad a los resultados de un tramo con el siguiente aguas arriba (considerando el comportamiento subcrítico del río). En todos los casos las mallas también tienen introducidas la información de rugosidades, azudes y puentes.

En el caso de los puentes, su implementación merece ser comentada ante los problemas que ocasiona en el momento de realizar los cálculos. Debido a la no-disponibilidad de la herramienta actual de modelización de puentes de Iber, en el modelo de URA están introducidos como una combinación de compuerta y azud funcionando de manera simultánea. La componente de compuerta se utiliza para describir el flujo del agua cuando el nivel de ésta no llega a la cota inferior del tablero del puente, y la componente de azud se utiliza para describir el flujo que pasaría por encima del tablero una vez todo el puente se encontrase sumergido. Esta formulación no resulta efectiva, pues se ha comprobado que Iber interrumpe el cálculo una vez la lámina de agua alcanza la cota superior de la compuerta debido a que el modelo se vuelve inestable.

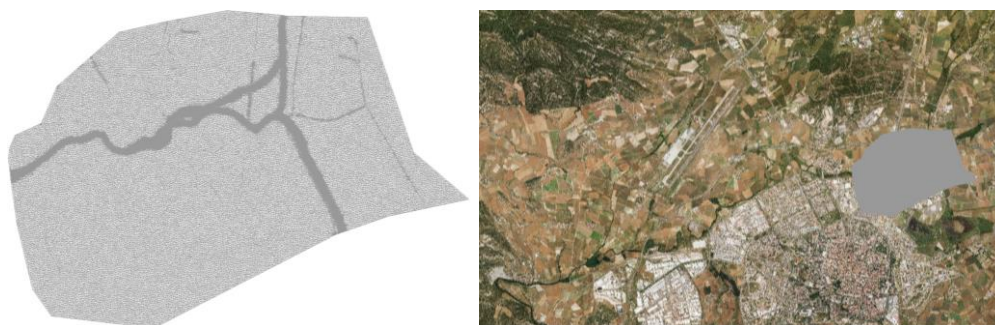


Figura 22. Detalle de una de las mallas de Iber (izquierda), y su extensión sobre una ortofoto del Zadorra a su paso por Vitoria (derecha).

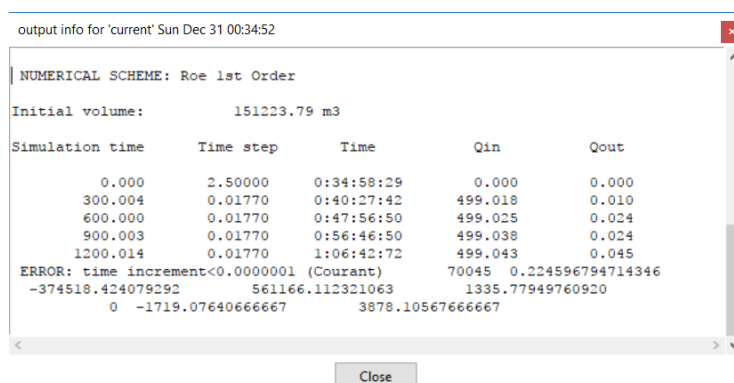


Figura 23. Mensaje de error que proporciona Iber cuando el agua alcanza la cota superior de la compuerta que se utilizaba para modelar los ojos de los puentes.

El modelo no cumple la condición de Courant y se vuelve inestable. Este mensaje de error sólo aparece si se abre el panel de información del proceso de cálculo: de no hacerlo, uno podría creer que el modelo ha calculado satisfactoriamente y que los resultados disponibles en el post-proceso son finales y válidos.

3.2. Modificaciones realizadas en el marco del estudio de inundaciones de URA

Partiendo de la base proporcionada por los modelos entregados por URA, se decidieron aplicar una serie de modificaciones para adecuarlos a los requerimientos del estudio que se estaba realizando para URA. Dichas modificaciones se realizaron en ambos modelos, aunque en distintos grados. Se explican a continuación.

3.2.1. Modificaciones realizadas sobre el Hec-Ras original

La mayoría de las modificaciones realizadas sobre los modelos de URA se concentraron en el modelo Hec-Ras al ser el modelo más ejecutivo para sacar resultados, dada la lentitud del cálculo en Iber para las mallas disponibles⁴.

De entre todas las modificaciones realizadas, las más destacadas fueron la purga de los afluentes menores del Zadorra para simplificar el esquema fluvial a utilizar, la calibración de nuevas rugosidades a partir de datos de episodios de crecidas reales de los últimos años, y el uso de la herramienta de Hec-Ras que permite la optimización del reparto de caudales en un punto de bifurcación. A continuación se explican brevemente estos cambios, pues se han mantenido hasta el modelo que se usa en el presente estudio:

- Nueva extensión del esquema fluvial del Zadorra. Con la vista puesta en la calibración del modelo mediante datos de episodios de crecida reales, se prescinde de todos los afluentes que no cuenten con una estación de aforo que pueda proporcionar datos fiables de calados o caudales. Coincide que de esta manera, se eliminan todos los afluentes menores del Zadorra, siendo el río Zaya el único afluente de una cierta envergadura que no se conserva en el modelo final. El cambio de extensión del modelo vino acompañado del cálculo de una nueva condición de contorno aguas abajo, calculada en el azud de Trespuentes. El nuevo esquema se puede observar en la Figura 24.

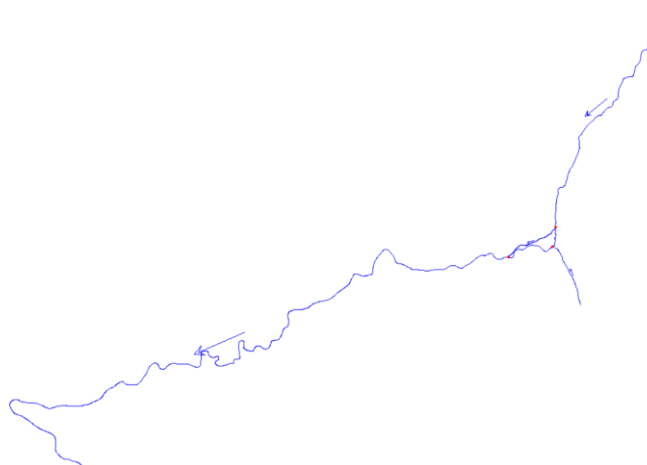


Figura 24. Nueva extensión del esquema fluvial utilizado en Hec-Ras.
Como se puede observar, sólo se ha conservado el Zadorra, el Alegría y el cauce de alivio del Zadorra.

⁴ El promedio de cálculo era de 7 horas en un ordenador común como el que se puede disponer en las aulas informáticas de la universidad.

3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica

3.2. Modificaciones realizadas en el marco del estudio de inundaciones de URA

- Calibración de nuevas rugosidades. A partir de la última ortofoto disponible en el momento de realización del estudio para URA, se clasificó el tipo de terreno que se observaba en una serie de categorías. Estas categorías son los diferentes tipos de rugosidades que luego se aplicarían al modelo. Empezando con unos valores extraídos de la bibliografía, se calibraron los valores de la rugosidad con los datos de calados disponibles en las diversas estaciones de aforo del Zadorra y Alegría. Para la calibración se utilizaron los episodios de crecida que se habían detectado desde que las estaciones estaban en funcionamiento (resumidos en la Tabla 2). Después de la calibración, el error de las diferencias de calados simulados y medidos promedio para todas las estaciones de aforo fue de un 5%, resultado que se consideró satisfactorio.

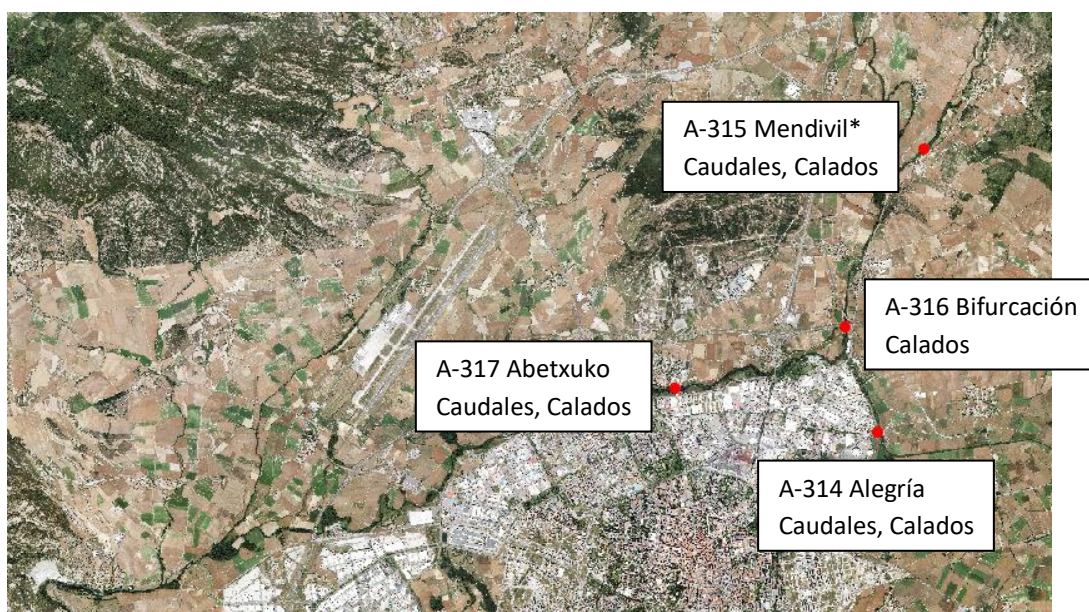


Figura 25. Ubicación de las estaciones de aforo del SAIH (marcadas en rojo) sobre una ortofoto del Zadorra a su paso por Vitoria.

Se puede comprobar cómo coinciden con los cauces que se mantuvieron en la nueva extensión del Hec-Ras. *La estación de aforo de Mendivil cambió su ubicación a principios del año 2016.

- Herramienta de optimización de los caudales en una bifurcación. A la hora de definir los episodios de crecida que se iban a simular en Hec-Ras surgía la duda de cómo repartir el caudal en la bifurcación que se produce en el azud de derivación, donde nace el cauce de alivio del Zadorra. El reparto de caudales ha de ser tal que la energía en un ramal después de la bifurcación sea la misma que en el otro. Para lograr esto, se debería iniciar un proceso iterativo, en que para cada caudal en el Zadorra se asignase un reparto de caudales, se comparasen luego las energías para cada ramal, y en función de las diferencias que se observasen ajustar el reparto en el azud de forma manual hasta lograr el equilibrio. Cuando se descubrió que Hec-Ras disponía de una herramienta incorporada en el mismo programa que se encargaba de realizar estas iteraciones, se utilizó de grata manera. Según parece, esta herramienta no se utilizaba en los modelos originales entregados por URA.

- Otros cambios introducidos en el modelo unidimensional fueron la introducción de nuevas secciones para mejorar la caracterización del flujo en el entorno de los puentes, la adecuación de los márgenes de los cauces principales (*bank stations*), la adecuación de la definición de las confluencias y la calibración de la extensión transversal de los episodios de inundación mediante la introducción de elementos que impidieran el flujo más allá de los límites observados en los episodios reales⁵.

3.2.2. Modificaciones realizadas sobre el modelo Iber original

Tal como se comentaba al inicio del apartado anterior, en Iber sólo se realizaron modificaciones menores al quedar relegado a un papel de complemento del modelo Hec-Ras en situaciones concretas, debido a su mayor lentitud de cálculo. En este caso, de las 6 mallas de URA disponibles sólo se utilizó una de ellas en una zona que se consideró que Hec-Ras no podría describir adecuadamente, dado su marcado carácter bidimensional.

Respecto a los cambios realizados en el modelo, sólo se puede comentar la de la adición de los puentes con la herramienta que se incorpora en Iber. Aun así, cabe ser crítico con la implementación que hace Iber (o cualquier otro modelo bidimensional) del cálculo en los puentes. Parece ser que se introducen dos líneas entre las que se aplica una fórmula de desagüe en orificio o a presión, con lo que no serían más avanzados que los modelos unidimensionales en este aspecto.

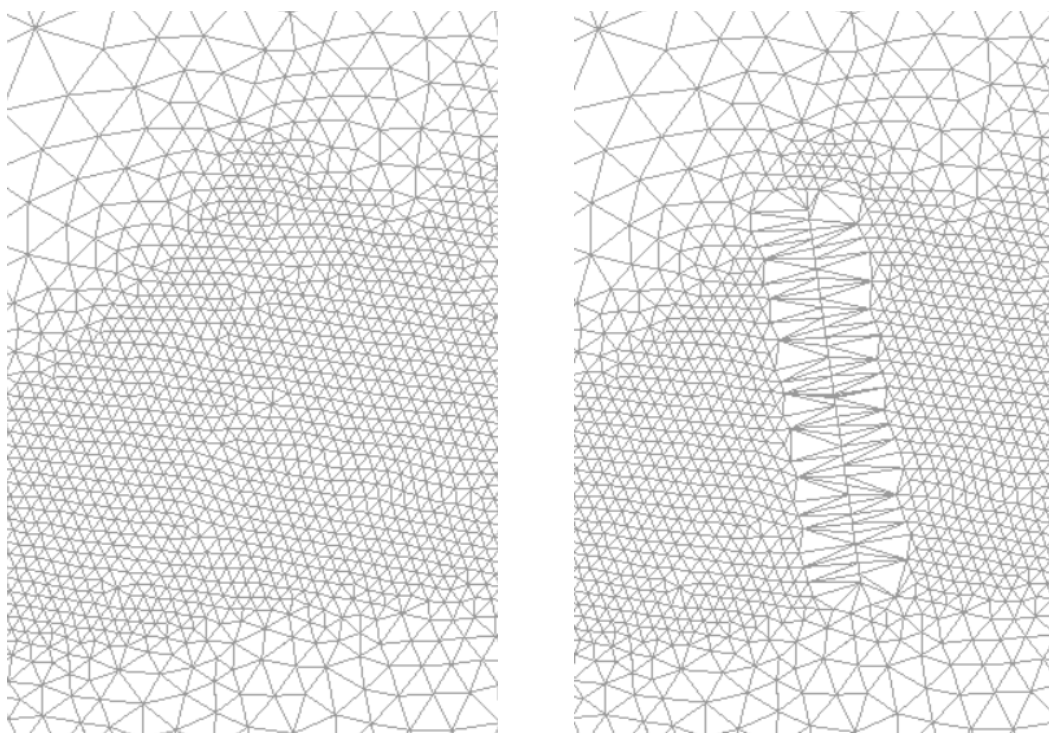


Figura 26. Ejemplo de las modificaciones en la malla que produce la adición de un puente con la herramienta integrada en Iber.

⁵ Este último cambio no tiene relevancia en el presente estudio, ya que la introducción de estos elementos que impedían el flujo más allá de la extensión deseada se realizó aguas abajo de la zona de estudio actual.

3.3. Preparación de los modelos hidráulicos en el marco del presente estudio

A partir de la experiencia adquirida en la preparación y manipulación de los modelos durante el estudio de URA, se está en disposición de encarar nuevas modificaciones a los modelos con el objeto de adecuarlos al estudio que se pretende realizar. En este apartado se describen las hipótesis y el proceso de preparación que se aplican a ambos modelos.

3.3.1. Hipótesis aplicadas sobre ambos modelos de cálculo

A continuación se exponen las hipótesis o consideraciones que se aplican en ambos modelos para optimizarlos para el estudio que se pretende realizar:

- A pesar de las posibilidades de cálculo no permanente que ofrecen ambos modelos, se decide efectuar los diferentes cálculos con régimen permanente. Esta decisión se toma al no tener previsto simular ningún caso real de crecidas. En su lugar se pretende simular el comportamiento del río ante diferentes condiciones de entradas de caudales, y para ello se considera que el cálculo en régimen permanente es suficientemente válido.

Para lograr alcanzar este régimen en Iber, se introduce un caudal constante y se aplica un tiempo de cálculo suficientemente elevado como para conseguir condiciones de flujo estables con el tiempo. Este margen de tiempo prudencial antes de conseguir condiciones estacionarias se estima en unas dos horas de simulación.

- Se decide prescindir completamente de los puentes en la zona de estudio, por dos motivos relacionados con el modelo bidimensional. Por un lado, la inclusión de los puentes en el modelo eleva considerablemente el tiempo de cálculo, haciéndolo inviable para simular los múltiples casos que se pretenden ejecutar. Por otro lado, con la eliminación de los puentes ya no hace falta preocuparse por la cuestionable implementación de conceptos unidimensionales en el cálculo del modelo bidimensional. Esta eliminación de los puentes no tiene mayor impacto en el estudio que se pretende realizar, al ser el principal objeto de estudio la caracterización del azud y su funcionamiento. Aunque es verdad que se pueden localizar puentes en todos los extremos de la zona de estudio, el único que podría tener algún efecto en el cálculo sería el puente ubicado aguas abajo dado el carácter subcrítico del flujo. Como este puente se encuentra lejos del azud de derivación se considera que no ejerce ninguna influencia sobre él.
- Se reduce el alcance de la zona de estudio a la mínima expresión posible. La extensión de la zona de estudio queda comprendida entre los puentes de la autopista A-1 (en la bifurcación del Zadorra), el de la confluencia del Alegría y el de Gamarra Menor en el extremo aguas abajo.

Esta reducción de la zona de estudio a un pequeño sector del Zadorra no tiene efecto en el modelo Hec-Ras, del que únicamente se extraen los resultados de aquellos ríos y secciones de interés. Sin embargo, la reducción de la extensión sí que es muy útil en el modelo bidimensional, ya que permite reducir considerablemente los tiempos de cálculo al utilizar una malla de un menor número de elementos.

Una vez aplicadas dichas consideraciones a ambos modelos, cada uno de ellos se desarrolla de distinta manera. En los siguientes apartados se detalla la preparación de cada uno de ellos.

3.3.2. Preparación del modelo Hec-Ras

El modelo Hec-Ras utilizado parte de la base del modelo utilizado en el estudio realizado para URA, al que no se le realiza ninguna modificación más allá de la eliminación de los puentes de la zona de estudio. El único aspecto en el que se ha trabajado para preparar el modelo a las necesidades del presente estudio es en el de la inversión del sentido del flujo en un tramo del Zadorra (Zadorra-9), tal como se indica en la Figura 27.

Para la inversión del sentido del flujo en un tramo, es necesario eliminar el tramo actual y volver a crearlo de cero. Para ello se ha utilizado una extensión de ArcGIS llamada HEC-GeoRAS, desarrollada por el mismo Centro de Ingeniería Hidrológica que desarrolla Hec-RAS. Esta extensión permite tanto la creación de una geometría Hec-RAS como la visualización de resultados en ArcGIS, entre otros usos. En el caso de la creación del nuevo tramo con sentido de flujo inverso, se utiliza HEC-GeoRAS para definir el curso del cauce y de las secciones transversales. El resto de parámetros necesarios para completar la nueva geometría⁶ se definen invirtiendo los datos de los que ya disponía el modelo original: siendo que Hec-Ras define las secciones transversales tomando como referencia el margen izquierdo, al invertir este sentido del flujo en el Zadorra-9 se ha de cambiar también el punto de referencia de las secciones transversales, que ahora será el antiguo margen derecho de las secciones (ejemplo en la Figura 28).



Figura 27. Representación del sentido del flujo de Hec-Ras para los dos tipos de geometría considerados. Se indican los nombres con los que se definen los diferentes tramos de la zona de estudio. La única diferencia entre los modelos está en el sentido del flujo del tramo Zadorra-9.

⁶Topografía de las secciones y de los azudes, extensión de las rugosidades, ubicación de las áreas inefectivas y diques, y distancias entre secciones.

3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica

3.3. Preparación de los modelos hidráulicos en el marco del presente estudio

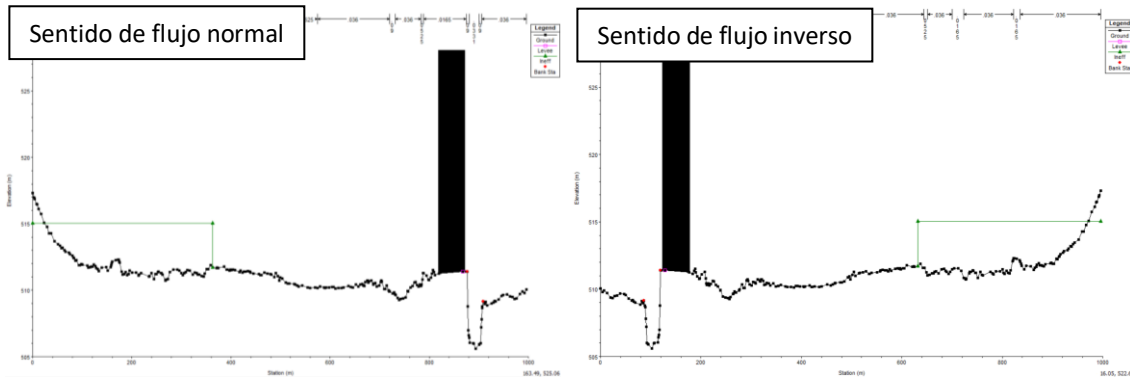


Figura 28. Ejemplo de la inversión de los diferentes parámetros de las secciones transversales (topografía, obstrucciones, área inefectiva) al realizar el cambio de sentido en el Zadorra-9.

3.3.3. Preparación del modelo Iber

Para la preparación del modelo bidimensional se descartan las mallas entregadas por URA, al resultar lentas al calcular. En su lugar se decide crear una nueva malla con una menor extensión y número de elementos con la que mejorar en tiempo de cálculo sin perder precisión en describir el comportamiento de la zona de estudio.

Las características de la nueva malla de Iber son las siguientes:

- Elementos triangulares de dos tamaños: 20 m de tamaño en las llanuras y 4 m en los cauces de los ríos. Con esta diferencia de tamaños se pretende priorizar la precisión del cálculo en aquellas zonas donde se espera circulación de agua. Como dato comparativo, en la malla de URA también se diferenciaba entre dos tamaños, con elementos triangulares de 20 m en las llanuras y 3 m en los cauces de los ríos.
- Topografía extraída del Modelo Digital de elevaciones con información detallada de Ríos (MDR) proporcionado por URA para el anterior estudio realizado para ellos. Este modelo se basa en un vuelo LIDAR realizado por el Gobierno Vasco en el año 2008, al que se le han aplicado una serie de correcciones para poder representar adecuadamente la topografía del cauce de los ríos. Estas correcciones son necesarias ya que el láser utilizado en los vuelos LIDAR no puede penetrar en el agua, y por lo tanto no puede determinar las cotas del lecho de los ríos.
- Para la definición de las rugosidades se utilizan los valores calibrados en el estudio realizado para URA.
- Del modelo unidimensional sin puentes se obtiene una curva de gasto (caudal-nivel del agua) que se impone como condición de contorno en el extremo aguas abajo de la malla.

Esta malla se ha utilizado como base de todos los estudios bidimensionales de los diferentes aspectos del río que irán apareciendo en el estudio.

3. Descripción de los modelos de simulación hidráulica

3.3. Preparación de los modelos hidráulicos en el marco del presente estudio

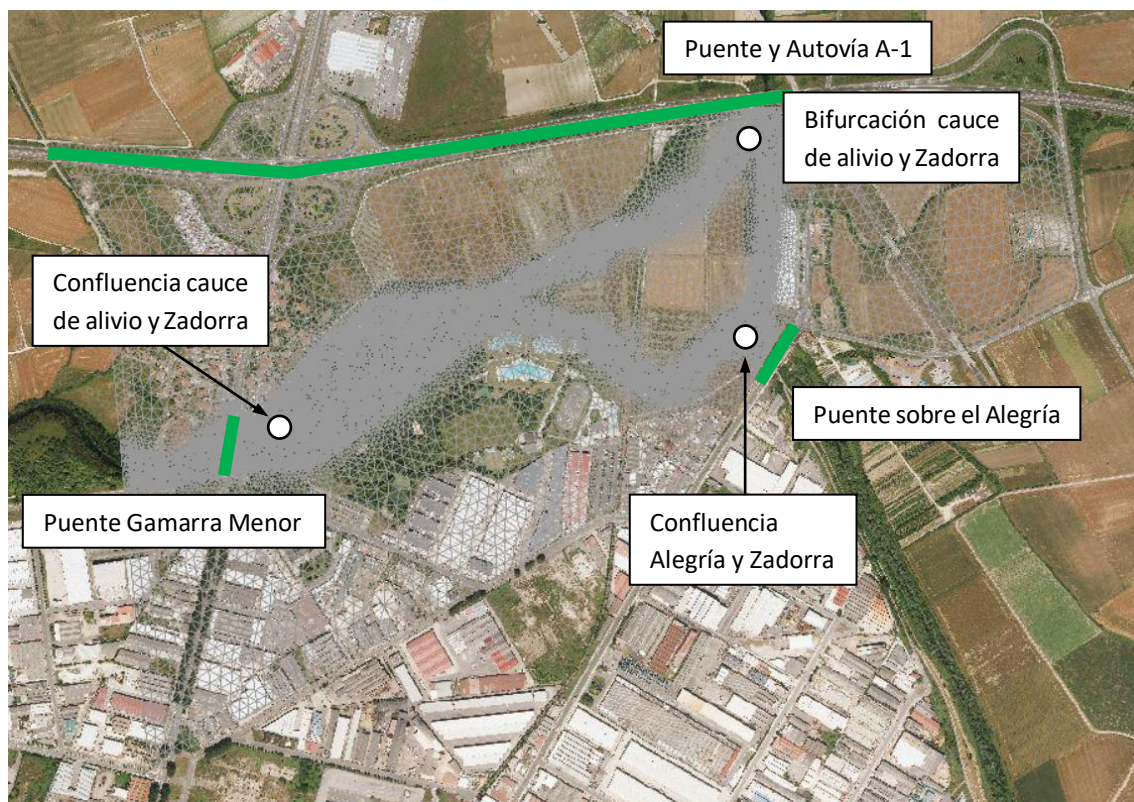


Figura 29. Ilustración de la extensión de la nueva malla utilizada en Iber. Sobre ella se indican en verde los elementos que se han utilizado para delimitar su extensión.

De forma adicional, se ha preparado una segunda malla (basada en esta malla principal) en la que se han eliminado el cauce de alivio y el azud de derivación del Zadorra. El objeto de esta nueva malla es estudiar el funcionamiento original del sistema *Zadorra-Alegría* antes de la implementación del cauce de alivio. Para lograr esto se esperaba poder consultar la topografía original de la zona en el proyecto original de construcción del cauce, que desgraciadamente no ha sido posible obtener. Para solventar este problema, se ha recurrido a una ortofoto de la zona tomada antes a la implementación del cauce de alivio (en la Figura 13 se muestra la del año 2002, que es la que se ha utilizado de referencia) y al MDR proporcionado por URA. Gracias a la ortofoto, se puede ver cómo los campos de cultivo delimitados por los dos ramales del Zadorra se extendían en su momento hasta la autopista A-1 al norte: por lo tanto, se ha considerado que en la topografía original los campos de cultivo sobre los que se construyó el cauce de alivio tenían la misma cota que los que existen hoy en día entre los ramales. Esta cota se consulta en el MDR, tras lo que se decide asignar una cota de 509 msnm a todo el cauce de alivio. De esta manera se logra reproducir, aunque de manera aproximada y poco precisa, la geometría original de la zona de estudio en el modelo bidimensional.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

En este apartado se pretende estudiar el funcionamiento de la zona del cauce de alivio, con la particularidad añadida de que se ubica en la misma zona en la que el Alegría desemboca en el Zadorra. Al ser el azud de derivación el principal elemento que define el reparto de caudales entre el cauce natural del Zadorra y su cauce de alivio, será el principal elemento a estudiar. Con el objeto de caracterizar el azud y el cauce de alivio se analizan los siguientes aspectos:

- La influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento. Se pretende estudiar el reparto de caudales en el punto en que el cauce del Zadorra se bifurca en su cauce natural y el cauce de alivio, y la influencia del caudal del Alegría en este reparto.
- La influencia de la abertura del azud en su funcionamiento. La peculiar geometría del azud de derivación, con una abertura en su centro, abre la puerta a la posibilidad de cambiar su “rendimiento” con cambios en dicha abertura. En este apartado se pretende estudiar la variación en el reparto de caudales en un escenario de ampliación y otro de reducción de la abertura. En paralelo al estudio de la influencia de la geometría del azud se consideran también diferentes escenarios de caudales del Alegría, para analizar su influencia en el reparto de caudales para las diferentes aberturas del azud.
- El funcionamiento del Zadorra antes y después de la implementación del azud y el cauce de alivio, para evaluar su eficacia contra inundaciones y su efecto en el sistema fluvial.

El análisis de los aspectos considerados se realiza tanto con el modelo unidimensional como con el bidimensional, con el objeto de contrastar los resultados de un modelo con el otro así como de detectar cualquier disparidad entre sus resultados. El caso de disparidad entre los resultados, el modelo bidimensional servirá como referencia, como sustituto de la realidad.

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

La principal función del azud de derivación es la de asegurar un reparto de caudales óptimo en el momento en que el Zadorra se bifurca en su cauce natural y el cauce de alivio, con el objeto de que se le reste suficiente agua al Zadorra como para que éste no inunde la periferia norte de Vitoria. Por lo tanto, el parámetro que interesa estudiar en este apartado es el porcentaje de caudal del Zadorra que el azud consigue derivar hacia el cauce de alivio. Asimismo, dada la particularidad de que la desembocadura del Alegría se ubica en esta zona de alivio del Zadorra, se espera que los caudales de agua transportados por este afluente también tengan un efecto en el reparto de caudales en el azud.

La estructura del estudio es la siguiente:

- 1) Ejecución de unos primeros casos tentativos y observación de patrones en el reparto de caudales.
- 2) Obtención del dominio de combinaciones de caudales de entrada al sistema que define los dos sentidos de flujo identificados en el tramo Zadorra-9.
- 3) Caracterización del porcentaje de caudal del Zadorra derivado al cauce de alivio.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

4.1.1. Ejecución de unos primeros casos tentativos y observación de patrones en el reparto de caudales

A modo de primera aproximación al estudio del reparto de caudales, se ejecutan una serie de combinaciones de caudales para el Zadorra y el Alegría con el modelo unidimensional. Con estos casos se espera identificar algún patrón en el reparto de caudales en función de los caudales de entrada al sistema. Después de los primeros casos ejecutados, se puede observar el siguiente patrón:

- Para un aumento del caudal del Alegría manteniendo el caudal del Zadorra constante, el porcentaje de agua derivada por el azud se incrementa.
- Para un aumento del caudal del Zadorra manteniendo el caudal del Alegría constante, el porcentaje de agua derivada por el azud disminuye ligeramente.

Durante la ejecución de estos primeros casos se ha observado asimismo cómo para algunas de las combinaciones de caudal introducidas el programa falla y no logra dar un resultado en el número de iteraciones indicadas. Una parte de los casos ejecutados, seleccionados para ilustrar el patrón y la problemática encontrada, se resumen en la siguiente tabla.

Zadorra (m³/s)	10	10	10	15	15	15	90
Alegría (m³/s)	10	20	60	20	40	60	20
Cauce de alivio (m³/s)	2.75	4.97	10	6.93	12.74	15	35.65
% derivado	28%	50%	100%	46%	85%	100%	40%

Tabla 3. Parte de los primeros casos ejecutados en Hec-Ras para intentar establecer un patrón en el reparto de caudales en el azud.

En sombreado rojo se indican aquellos repartos de caudales para los que el programa no logra dar un resultado de reparto de caudales en el azud.

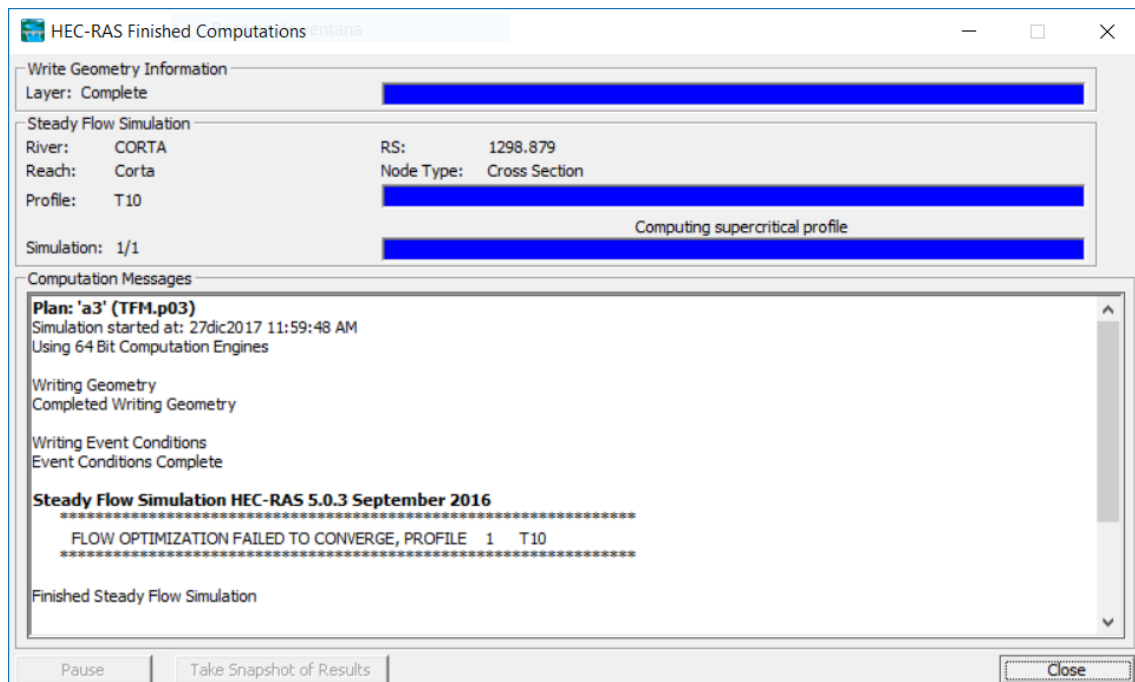


Figura 30. Mensaje de error proporcionado por Hec-Ras en aquellos casos en que falla y no logra dar un resultado para la optimización del reparto de caudales.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Como se puede observar en la Tabla 3, los casos en que el programa falla al establecer el reparto de caudales cuentan con un caudal de entrada del Alegría relativamente elevado respecto al caudal del Zadorra. Otra característica común a ambos casos es que el porcentaje de caudal que el programa acaba asignando al cauce de alivio respecto al caudal de entrada del Zadorra es del 100%.

A partir del patrón observado, tanto para los casos en que el programa sí ha logrado resolver el reparto de caudales como para los casos en que no, se formula una hipótesis del porqué existen estas combinaciones de caudales para las que Hec-Ras no logra obtener un resultado: el caudal que transporta el cauce de alivio es superior al 100% del caudal de entrada del Zadorra, y esto sólo es posible si el cauce de alivio recibe caudal del Alegría. Para que esto sea posible, el Alegría ha de remontar aguas arriba un pequeño tramo del Zadorra (referido como Zadorra-9, según su identificación en el modelo de Hec-Ras). Es este nuevo sentido del flujo del tramo del Zadorra el que causa el fallo de Hec-Ras, ya que el programa no contempla más que un sentido del flujo para cada tramo de río en condiciones de régimen permanente.

Así pues, se crea una nueva geometría en Hec-Ras que permita el flujo en sentido aguas arriba en el tramo Zadorra-9 para verificar la hipótesis acerca de la incapacidad del programa de proporcionar resultados. Siguiendo la lógica anterior, para esta nueva geometría sólo se permite el flujo aguas arriba, y por tanto cualquier combinación de caudales de la Tabla 3 que diera resultados para la geometría original ahora debería fallar y no proporcionar resultados.

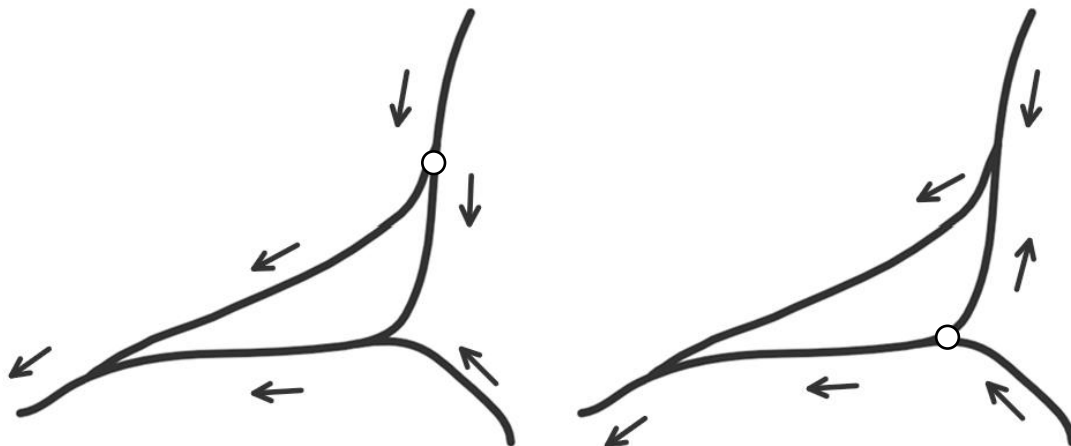


Figura 31. Esquema de los sentidos del flujo en la geometría original de Hec-Ras (izquierda) y en la nueva geometría de flujo inverso (derecha).

Se muestran los puntos dónde se le indica al programa que calcule la optimización del reparto de caudales. Se observa como en la nueva geometría, la optimización del reparto de caudales se realiza en la confluencia del Alegría con el Zadorra, y no en el azud de derivación.

Los resultados de las combinaciones de caudales originales con la nueva geometría se presentan en la siguiente tabla.

Zadorra (m ³ /s)	10	10	10	15	15	15	90
Alegría (m ³ /s)	10	20	60	20	40	60	20
Cauce de alivio (m ³ /s)	10	10	15.35	15	15	17.35	90
% derivado	100%	100%	154%	100%	100%	116%	100%

Tabla 4. Resultados de las combinaciones de caudales de la Tabla 3 calculadas con la nueva geometría de flujo inverso en el tramo Zadorra-9.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Se puede observar cómo, efectivamente, las combinaciones de caudales que en la geometría original resolvían el reparto de caudales ahora no logran hacerlo para la geometría con flujo aguas arriba, y viceversa. En los casos en que el programa no proporciona resultados le asigna el 100% del agua del Zadorra al cauce de alivio, siendo que éste es el valor mínimo que el programa permite tener al cauce de alivio bajo los nuevos sentidos de flujo impuestos.

Por lo tanto, se observa como la configuración del sistema fluvial permite un flujo bidireccional en el tramo Zadorra-9 en función de sus caudales de entrada. Caracterizar las combinaciones de caudales de entrada que provocan un flujo en un sentido u otro es objeto de estudio del siguiente apartado.

4.1.2. Obtención de la zona admisible de combinaciones de caudales de entrada para cada sentido de flujo en el tramo Zadorra-9

Se definen dos posibles funcionamientos para el sistema fluvial, en función del sentido del flujo en el tramo Zadorra-9:

- Un funcionamiento normal, en que el agua fluye aguas abajo entre el azud de derivación y la confluencia con el Alegría. Se le denomina normal, porque es el caso que se dará en circunstancias normales, en que el caudal que aporta el Zadorra es o bien superior o bien equivalente al caudal del Alegría. En este caso, el reparto de caudales se calcula en el azud de derivación.

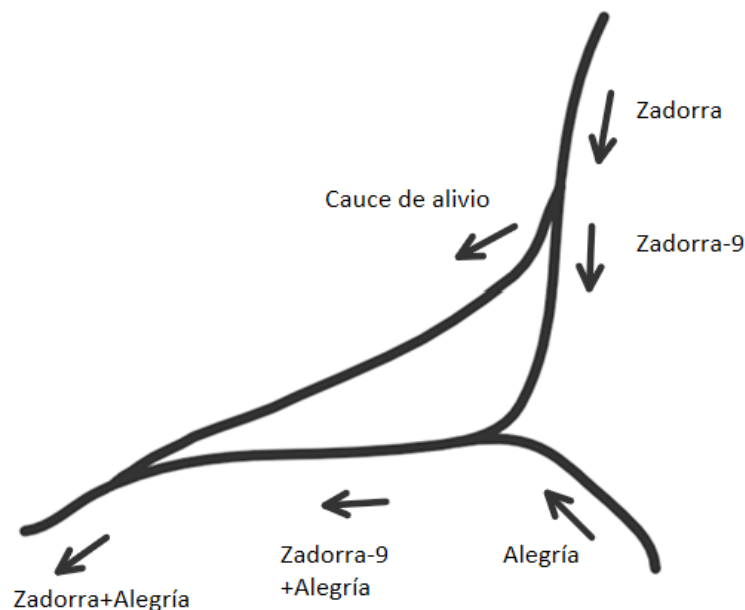


Figura 32. Sentido del flujo de cada río para un funcionamiento normal del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría.

- Un funcionamiento inverso, en que el agua fluye aguas arriba entre el azud de derivación y la confluencia con el Alegría. En este caso, se produce un reparto del caudal del Alegría en su confluencia con el Zadorra. Parte de este caudal remonta el Zadorra aguas arriba, y se une al caudal del Zadorra en el azud de derivación: es por eso que el cauce de alivio transporta valores superiores al 100% del caudal del Zadorra, pues cuenta con una aportación adicional del Alegría.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

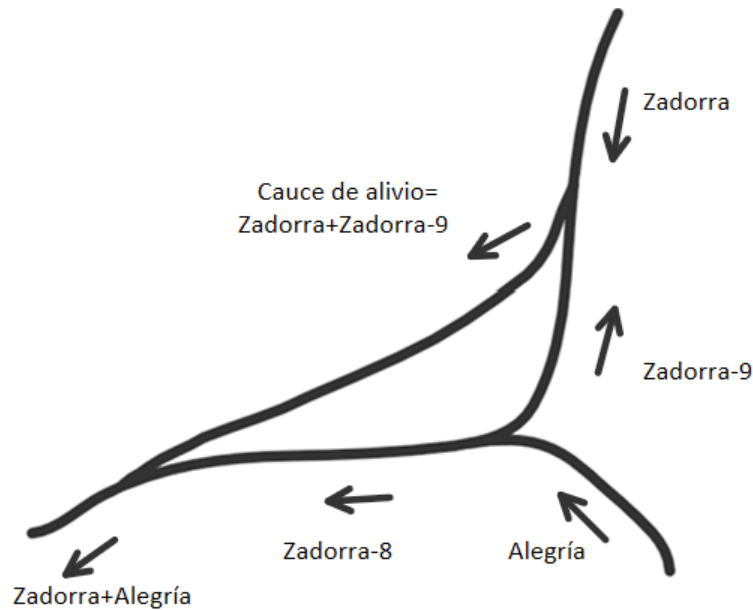


Figura 33. Sentido del flujo de cada río para un funcionamiento inverso del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría.

Como se puede observar en las figuras anteriores, la principal diferencia entre los dos tipos de funcionamientos es el sentido del flujo en el tramo Zadorra-9. El flujo en dicho tramo depende de la combinación de caudales que se introduzcan al sistema; se espera que exista todo un conjunto de combinaciones de caudales que actúen a modo de frontera para las que el tramo Zadorra-9 esté en reposo. En este estado de reposo no se produciría un flujo efectivo ni aguas arriba (funcionamiento inverso) ni aguas abajo (funcionamiento normal).

De ser cierta esta hipótesis, existirá un límite para el que el agua en el Zadorra-9 circula aguas abajo, y otro límite para el que el agua circula aguas arriba. Al considerar que existe una “zona de frontera” para la que el Zadorra-9 está en reposo, se considera que los límites de cada tipo de funcionamientos no tienen por qué coincidir aunque tampoco que se separen mucho.

Para encontrar estos límites fronterizos se estudia con los modelos de Hec-Ras e Iber un amplio rango de combinaciones de caudales de entrada en el Zadorra y el Alegría. La metodología empleada es la siguiente:

- Se toma un rango de caudales del Zadorra, separados entre ellos cada $5 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Para cada valor del Zadorra considerados, se encuentra el último caudal del Alegría para el que el flujo del Zadorra-9 va en sentido aguas abajo y aguas arriba:
 - Para el caso de funcionamiento normal, se irá incrementando el valor del caudal del Alegría hasta que el flujo en el Zadorra-9 ya no circule en sentido aguas abajo (en este caso Hec-Ras no dará resultado).
 - Para el caso de funcionamiento inverso, se irá reduciendo el valor del caudal del Alegría hasta que el flujo en el Zadorra-9 ya no circule en sentido aguas arriba (en este caso Hec-Ras tampoco dará resultado).
- Se construyen las curvas que definen el límite del dominio de los caudales para los que se produce un flujo normal o inverso, en ejes *caudal Zadorra-caudal Alegría*.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Las curvas obtenidas en Hec-Ras presentan un aspecto bastante lineal, especialmente la curva límite del funcionamiento inverso. Tal como se esperaba, las curvas límite de cada funcionamiento no coinciden, y de hecho se van separando más a medida que aumentan los caudales de entrada. Esto se traduce en que hay un rango de caudales apreciable en que Hec-Ras es incapaz de dar resultados, ya sea en funcionamiento normal o inverso. El área de esta zona frontera entre ambas curvas representa un 7.3% de todo el dominio de caudales que se ha considerado (caudales del Zadorra hasta 145 m³/s y del Alegría hasta 206 m³/s).

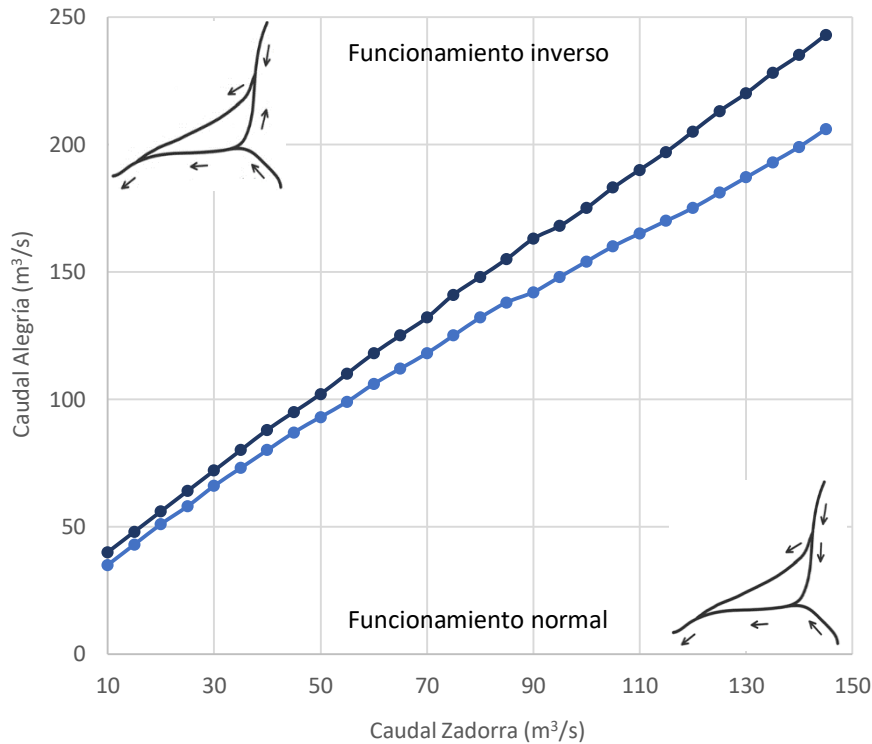


Figura 34. Límite de los dominios de las combinaciones de caudales que definen cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial, obtenido con Hec-Ras.

Las curvas obtenidas en Iber presentan, sin llegar a ser idénticas, un gran grado de coincidencia, al encontrarse separadas únicamente por pocos m³/s del Alegría (medidos en el eje de las ordenadas) a lo largo de un gran rango de caudales del Zadorra. Las curvas se separan aproximadamente a partir de las combinaciones de caudales que provocan el desbordamiento de los márgenes del Zadorra-9. El área de la zona frontera entre ambas curvas representa un 3.1% de todo el dominio de caudales que se ha considerado (caudales del Zadorra hasta 130 m³/s y del Alegría hasta 203 m³/s). Si se considera el área hasta el momento anterior a que se desborden los márgenes del Zadorra-9⁷, esta área representa sólo el 2.0% de todo el dominio de caudales considerados. Las magnitudes de las áreas de estas zonas de frontera tanto de Hec-Ras como de Iber se resumen en la Tabla 5.

⁷El desbordamiento de los márgenes del Zadorra-9 comienza a observarse para un caudal del Zadorra de 95 m³/s aproximadamente. Es a partir de este momento que las curvas de Iber comienzan a separarse, siendo evidente esta separación para caudales del Zadorra de 110 m³/s en adelante.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

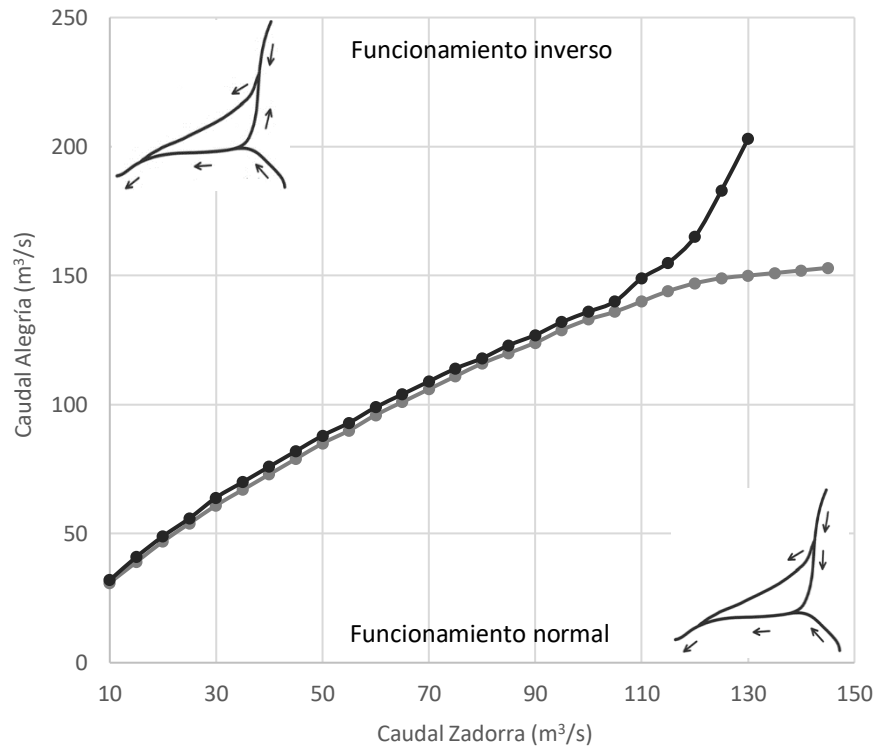


Figura 35. Límite de los dominios de las combinaciones de caudales que definen cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial, obtenido con Iber.

Modelo	Dominio de caudales (m³/s)		% área de frontera sobre el dominio
	Zadorra	Alegría	
Hec-Ras	145	206	7.3%
Iber	130	203	3.1%
	95	132	2.0%

Tabla 5. Dimensiones de las áreas de frontera definidas entre las curvas límite del flujo normal e inverso. Hec-Ras no calcula los casos dentro de esta zona de dominio, mientras que en Iber estos casos presentan tramos con flujo bidireccional.

A partir del momento en que se desbordan los márgenes del Zadorra-9, la curva límite del funcionamiento inverso en Iber se separa de la del funcionamiento normal experimentando un gran aumento de su pendiente: de haberse calculado los tres valores restantes de la curva (equivalentes a valores de 135, 140 y 145 m³/s de entrada en el Zadorra) se hubiera podido comprobar si el cambio en el comportamiento de la curva sigue una lógica lineal, o se vuelve más acusada a mayores caudales. Ajeno al comportamiento del funcionamiento inverso, la curva límite del funcionamiento normal parece tener una pendiente cada vez más pequeña, convergiendo a valores cercanos a 150 m³/s de entrada en el Alegría a partir de caudales de 130 m³/s de entrada en el Zadorra.

De la comparación de las curvas obtenidas con ambos modelos, se observan dos diferencias principales:

- La zona frontera delimitada por las dos curvas límite es mayor en el caso de Hec-Ras que en el caso de Iber, para aquellos valores en que el agua no desborda los márgenes del Zadorra-9. Este hecho se puede observar en la Figura 37 y la Tabla 5.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

- Las curvas de Hec-Ras se sitúan por encima de las de Iber en el espacio *caudal Zadorra-caudal Alegría*. Por lo tanto tienen una mayor componente en el eje de ordenadas: es decir, sus casos límite se dan para un mayor caudal del Alegría manteniendo el caudal del Zadorra constante. Este hecho se puede observar en la Figura 39.

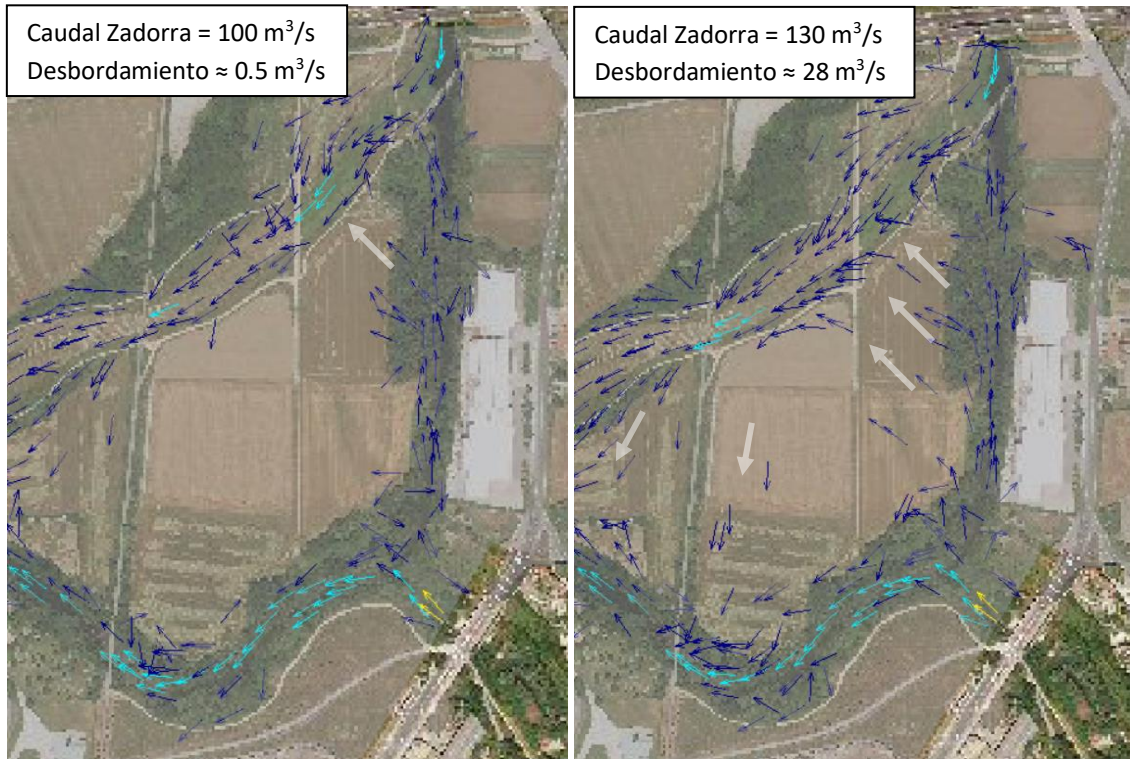


Figura 36. Representación de los vectores de velocidad obtenidos con Iber para algunos casos límite de funcionamiento inverso en los que se detecta desbordamiento en los márgenes.

El color de los vectores depende del valor de la velocidad. Se representan sólo 1 de cada 35 vectores: es por ello que hay puntos donde apenas se aprecia el desbordamiento. Para visualizar mejor estos desbordamientos, se indican con flechas blancas transparentes los itinerarios a través de las llanuras que sigue el agua entre los distintos ramales de la zona de estudio.

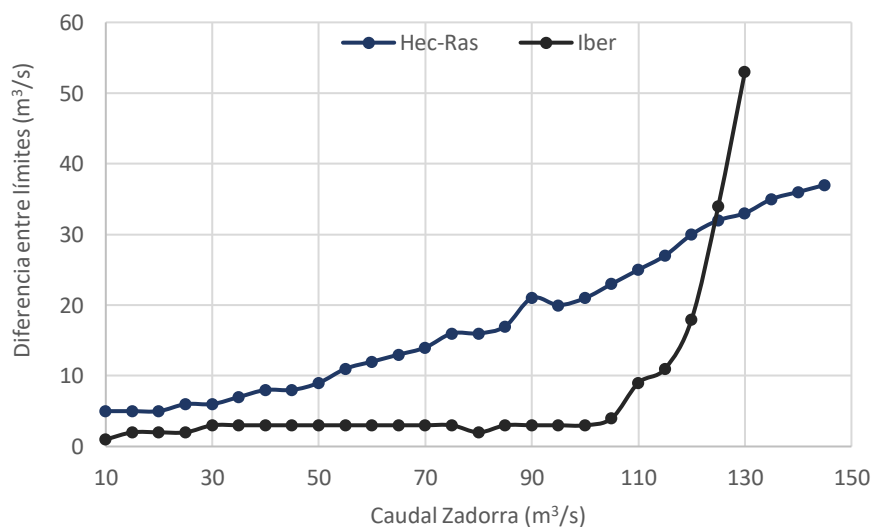


Figura 37. Diferencia en caudal de entrada del Alegría entre las curvas límites del funcionamiento normal e inverso.

Se obtiene de la resta de las ordenadas de la Figura 34 (curva de Hec-Ras) y la Figura 35 (curva de Iber).

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

La diferencia en el ancho de la zona frontera entre las dos curvas límite (medido en el eje vertical, es decir, en términos de caudal del Alegría) es mayor en Hec-Ras que en Iber. En el caso de Hec-Ras, esto es un problema al no poder resolver el cálculo para los valores dentro de esta zona frontera. Sin embargo, en Iber sí que se pueden realizar cálculos con combinaciones de caudales que caigan en esta zona: en este caso se obtienen resultados con flujo bidireccional en el Zadorra-9, y por eso no se ha incluido ni en la zona de funcionamiento normal ni en la zona de funcionamiento inverso.

Es posible que la diferencia entre Hec-Ras e Iber en las dimensiones de la zona frontera se deba al criterio con el que se han seleccionado los casos límites en Iber. En Iber, se considera que una combinación de caudales da un flujo normal (o inverso) si se observa un flujo predominante y suficientemente continuo en uno de los dos sentido. Aun así, esta condición es bastante subjetiva, y no se llega a aplicar nunca de forma totalmente estricta: existen casos en que debido a la presencia de pequeños remolinos hay zonas donde se produce flujo en sentido contrario al del conjunto del Zadorra-9. En cambio, Hec-Ras es totalmente objetivo al definir el sentido del flujo: cómo sólo admite el cálculo en un sentido, el programa no proporciona resultados para aquellos casos en que el flujo de agua circula en sentido contrario al predeterminado.

En la Figura 38 se intenta ilustrar el criterio que se ha utilizado en Iber para definir las curvas límite. La figura de la izquierda corresponde a un caso en que se considera que el flujo es inverso (es el caso límite de este tipo de flujo), mientras que la figura de la derecha se corresponde a un caso que no se ha considerado ni de funcionamiento normal ni inverso. En ambas figuras se pueden intuir remolinos, de menor entidad en el caso de la izquierda que en el de la derecha. A pesar de esto, se puede observar como en el caso de la izquierda el flujo va predominantemente aguas arriba y con apenas variaciones en su dirección. Por el contrario, en el caso de la derecha el flujo es más caótico, con varias variaciones de dirección fruto de sus mayores remolinos. En el caso de la derecha incluso se pueden observar tramos dónde el flujo de agua es bidireccional, opción que Hec-Ras no calcularía al aceptar sólo flujo en un sentido. Por lo tanto, es la ausencia de un carácter caótico y bidireccional el criterio con el que se han definido las curvas límites en Iber.

Como se ha indicado antes, este criterio descrito para Iber es totalmente subjetivo. Visto en perspectiva, un criterio más objetivo hubiera sido más útil para comparar ambos modelos y definir el comportamiento del río. Un criterio objetivo podría haber sido calcular el sentido del agua a través de la abertura del azud: si el agua cruzase el azud de norte a sur se trataría de un flujo normal, y si lo hiciera de sur a norte se trataría de un flujo inverso. De esta manera, se hubiera equiparado el criterio en Iber con el comportamiento observado en Hec-Ras.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

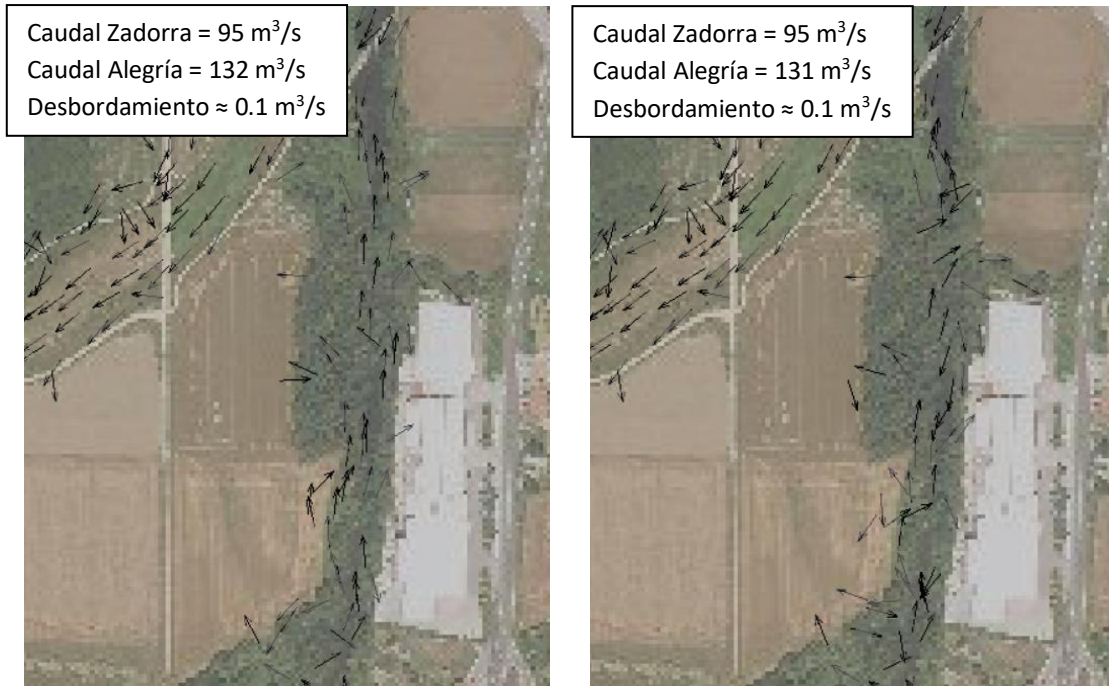


Figura 38. Vectores de velocidades obtenidos en el Zadorra-9 para un caso límite de funcionamiento inverso (izquierda) y uno de la zona de frontera (derecha) con el mismo caudal en entrada en el Zadorra. Aunque se haya considerado el caso de la izquierda como un ejemplo de funcionamiento inverso (al ir el flujo de agua en sentido aguas arriba), hay zonas donde se detectan pequeños remolinos, y por tanto hay flujo en sentido aguas abajo. A la derecha se puede observar un caso de la zona frontera para el mismo caudal de entrada en el Zadorra. En este caso los remolinos son mayores, y se observa como una mayor cantidad de vectores tienen un sentido perpendicular o contrario al del flujo aguas arriba. De esta manera, se considera el caso de la derecha como caótico, y por tanto se incluye en la zona de frontera. Sólo se muestran 1 de cada 30 vectores obtenidos.

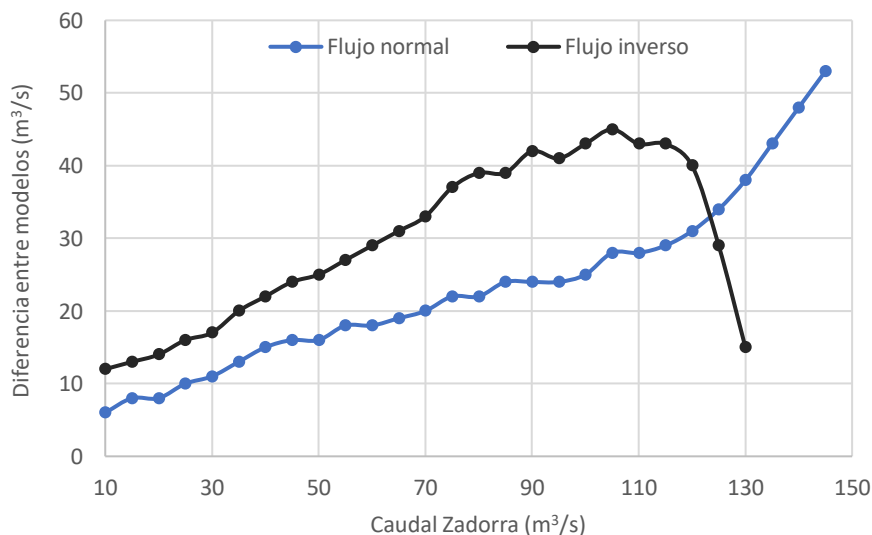


Figura 39. Diferencia entre las curvas límite de los distintos modelos, diferenciados según cada tipo de funcionamiento.

Cada curva de las mostradas en esta figura se corresponde a un tipo de funcionamiento, y se obtiene de la resta de las ordenadas de la curva límite correspondiente del modelo Hec-Ras (Figura 34) con las ordenadas de la curva equivalente en el modelo Iber (Figura 35).

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Por último, en la Figura 39 se observa una gran diferencia entre los caudales asignados al Alegría en Hec-Ras e Iber en sus curvas límite, tanto de funcionamiento normal como inverso. Esta diferencia también puede deberse al comentado criterio subjetivo empleado en Iber para definir las curvas límite. Otra posibilidad es que la diferencia se deba a la introducción de parámetros idénticos en ambos modelos, cuando en realidad deberían variar en función del modelo en que se introduzcan. Un claro ejemplo del error de tratar por igual a ambos modelos al introducir datos es el de la asignación de la rugosidad del cauce, al incorporar el modelo bidimensional de manera implícita una serie de parámetros que en el modelo unidimensional se han de añadir de forma adicional. Este fenómeno se estudia en el apartado 5.3.

Se puede ver como el criterio de definición de las curvas límite en Iber pone en duda las diferencias observadas entre las curvas de ambos modelos: la desafortunada elección de un criterio subjetivo compromete los valores que se han calculado con Iber, y es un punto que sería necesario abordar en una revisión o continuación de un estudio de estas características. A pesar de considerarse como un elemento crítico para mejorar la descripción del comportamiento del sistema fluvial y comparar en mayor igualdad de condiciones los resultados de Iber con los de Hec-Ras, en este estudio no se aborda la aplicación de un criterio más objetivo: no se ha tenido suficiente tiempo como para emprender de nuevo el proceso de iteración necesario para recalcular estas curvas, dado el mayor tiempo computacional que requiere Iber.

A modo de recapitulación, se describen los aspectos estudiados en este apartado:

- Se localiza el conjunto de combinaciones de caudales, representados como curvas en un espacio *caudal Zadorra-caudal Alegría*, para los que se encuentra el límite del dominio de caudales que dan un flujo normal o inverso en el Zadorra-9. Se obtienen dichas curvas con los dos modelos de cálculos disponibles.
- Dichas curvas presentan diferentes comportamientos para cada modelo de cálculo. En Hec-Ras las curvas se van separando gradualmente, mientras que en Iber se separan bruscamente una vez el agua desborda por los márgenes del cauce. Esto puede deberse a la disparidad en el criterio con el que se definen los casos límite en cada modelo (más laxo en Iber, en que el criterio es subjetivo, que en Hec-Ras, que viene limitado por el mismo programa al no poder ejecutar los casos fuera del dominio de funcionamiento normal o inverso).
- Cuando se superponen las diversas curvas, se observa que las curvas obtenidas con Hec-Ras están por encima de las obtenidas de Iber en el espacio *caudal Zadorra-caudal Alegría* (ver Figura 40). Esto puede deberse una vez más al diferente criterio de definición de las curvas límite en Hec-Ras e Iber, aunque también se plantea que se deba a las diferencias en formulación e hipótesis en las que se fundamentan cada modelo. Más adelante, en el apartado 5.3, se comprueba que la rugosidad no es uno de los factores que explican esta diferencia de comportamiento.
- Con el objeto de validar todas las conclusiones que se extraen de la comparativa de las curvas límite obtenidas con Hec-Ras e Iber, se considera necesario recalcular las curvas de Iber con un criterio de definición más objetivo. De esta manera se podrán comparar ambos modelos con un criterio parejo.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

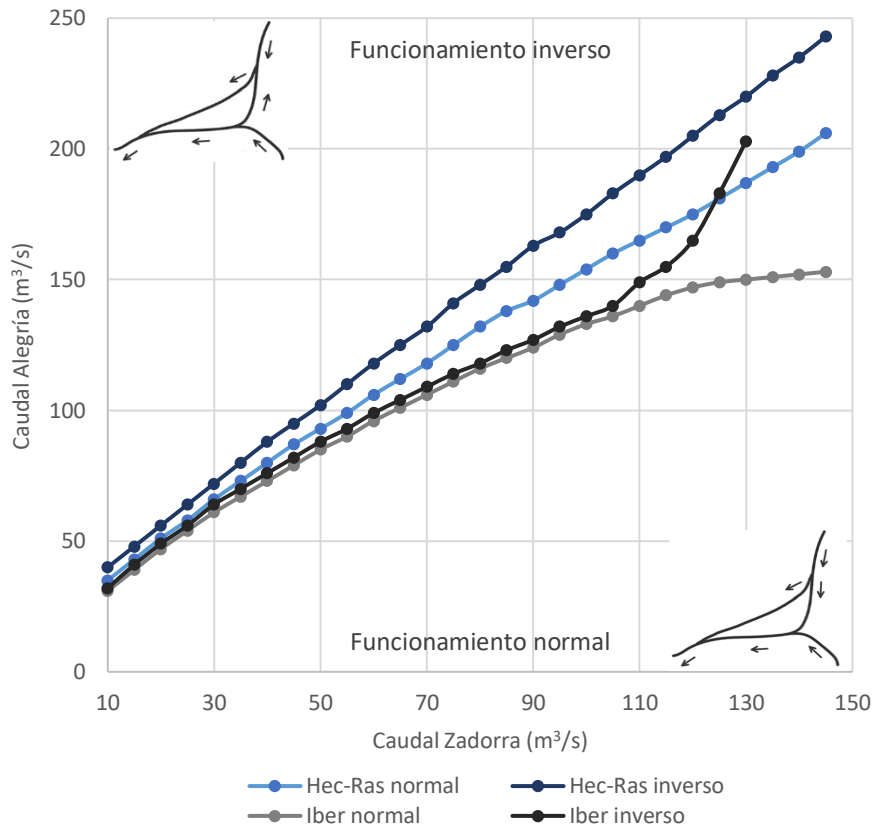


Figura 40. Resumen de las curvas límite de cada tipo de funcionamiento del sistema fluvial Zadorra-cauce de alivio-Alegría, para ambos modelos de cálculo utilizados.

4.1.3. Caracterización del porcentaje de caudal del Zadorra derivado al cauce de alivio

Una vez definidas las curvas límite que definen un flujo normal o inverso en el Zadorra-9, se pretende estudiar el comportamiento del propio azud al repartir los caudales del Zadorra entre su cauce de alivio artificial y su cauce natural. Con este estudio, se podrá contrastar el patrón observado tras la ejecución de una serie de combinaciones de caudales tentativas al inicio del apartado 4.1.1. El patrón observado se recuerda a continuación:

- Para un aumento del caudal del Alegría manteniendo el caudal del Zadorra constante, el porcentaje de agua derivada por el azud se incrementa.
- Para un aumento del caudal del Zadorra manteniendo el caudal del Alegría constante, el porcentaje de agua derivada por el azud disminuye ligeramente.

Para caracterizar el reparto de caudales, se pretende construir una gráfica con ejes *caudal Zadorra-caudal Alegría* en la que se muestren las isolíneas de los diferentes porcentajes de caudal que el azud deriva hacia el cauce de alivio. La metodología empleada para la obtención de dicha gráfica, que se muestra en la Figura 41, es la siguiente:

- a) Se define el modelo con el que se calculan los casos necesarios para construir las isolíneas. Ante el gran número de cálculos que son necesarios se descarta el uso del modelo bidimensional, dada la mayor agilidad que ofrece el modelo unidimensional.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

- b) Se define el dominio de combinaciones de caudales de entrada de Zadorra y Alegría para el que se calculan las isolíneas. De los dos posibles funcionamientos del sistema fluvial de estudio, únicamente en el de flujo normal se produce un reparto de caudales en el azud de derivación: para el caso de flujo inverso, en el azud simplemente se suma la fracción del caudal del Alegría que ha remontado el Zadorra-9 al caudal que baja por el Zadorra, para continuar su recorrido aguas abajo a través del cauce de alivio. Por lo tanto, el dominio que se usa es el del funcionamiento normal, según los resultados obtenidos con Hec-Ras (Figura 34).
- c) Se definen las combinaciones de caudales que se ejecutan para definir las isolíneas. En este caso, todos los puntos considerados se han de encontrar dentro del dominio de funcionamiento normal. Con el fin de reducir el número de casos a calcular, se toma una distancia de 5 m³/s entre cada caso tanto en el sentido del eje de abscisas (caudal de entrada del Zadorra) como en el de ordenadas (caudal de entrada del Alegría).
- d) Después del cálculo de cada uno de los casos de estudio, se obtiene un valor del porcentaje de caudal desviado al cauce de alivio para cada punto del plano *caudal Zadorra-caudal Alegría* calculado. Para transformar esta información asignada en puntos a isolíneas se propone una interpolación lineal con los porcentajes calculados. De esta manera, se calcula la posición de los puntos de las isolíneas en el plano *caudal Zadorra-caudal Alegría* mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{\text{Isolínea}} - Q_A}{Q_B - Q_A} = \frac{\%alivio_{\text{Isolínea}} - \%alivio_A}{\%alivio_B - \%alivio_A}$$
$$\%alivio_B > \%alivio_{\text{Isolínea}} > \%alivio_A$$
$$Q = (Q_{\text{Zadorra}}, Q_{\text{Alegría}})$$

Donde:

- $\%alivio_{\text{Isolínea}}$ indica la isolínea porcentaje que se quiere calcular.
- A y B indican puntos a un extremo y otro de la isolínea que se quiere calcular (por ejemplo, en el cálculo de la isolínea 60%, A y B indica un par de puntos en que A tiene un valor inferior y B un valor superior a 60%).
- Q es un punto del plano de caudales *Zadorra-Alegría*. Tal como se explica a continuación, es importante que la interpolación se haga en una dirección paralela a los ejes de este plano para reducir el error cometido.

La interpolación lineal para calcular las isolíneas no es una herramienta totalmente precisa. Si se imaginan los resultados como un gráfico tridimensional, en que las coordenadas “x” e “y” se corresponden a los caudales de Zadorra y Alegría y la coordenada “z” al porcentaje de caudal que se deriva al cauce de alivio, la interpolación lineal sólo sería correcta si los resultados calculados perteneciesen al mismo plano. Este no es el caso de los resultados obtenidos, al estar contenidos en una superficie no plana. Aun así, se considera que el espaciado entre puntos calculados es suficientemente pequeño (5 m³/s) como para que el error cometido al utilizar la interpolación lineal sea negligible.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Con el espíritu de obtener las isolíneas con el menor error posible, se aplica esta interpolación lineal sólo en una dirección a la vez, que ha de ser paralela a los ejes del plano *caudal Zadorra-caudal Alegría*: es decir, manteniendo el valor de la coordenada “x” o “y” fija, se interpola en la dirección de la otra (por ejemplo, una interpolación entre los puntos (5,10) y (5,15)). Si se hiciese una interpolación lineal en dos direcciones a la vez (por ejemplo, entre los puntos (5,10) y (10,15)) se estaría agregando el error cometido al simplificar la superficie no plana a un plano dos veces (una en la dirección del eje “x”, y otra en la dirección del eje “y”), reduciendo la calidad de esta interpolación.

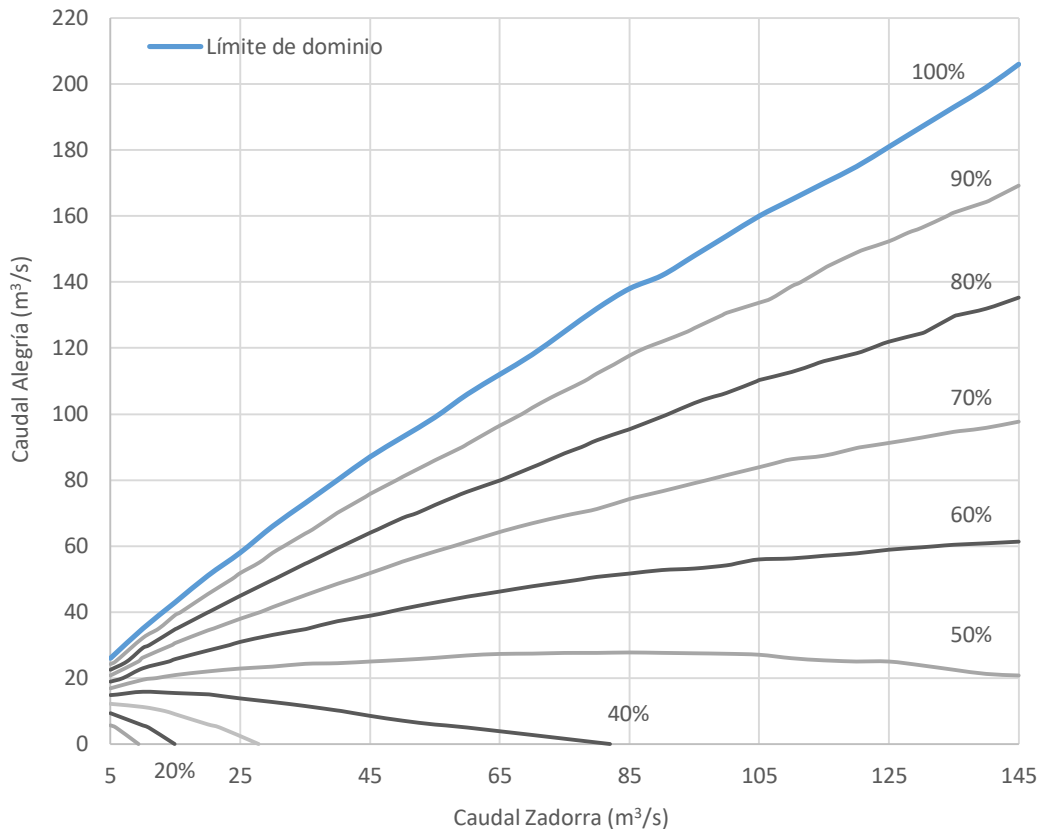


Figura 41. Isolíneas del porcentaje de caudal que desvía el azud hacia el cauce de alivio respecto al caudal de entrada en el Zadorra.

Una vez obtenidas las isolíneas, se está en disposición de sacar conclusiones acerca de los patrones en el reparto de caudales en el azud:

- Tal como se había observado con los primeros casos ejecutados, para un aumento del caudal de entrada del Alegría a igualdad de caudal del Zadorra (desplazamiento vertical en la Figura 41), se produce un aumento del porcentaje de caudal del Zadorra que se desvía al cauce de alivio.
- Sin embargo, para un aumento del caudal de entrada del Zadorra a igualdad de caudal del Alegría (desplazamiento horizontal en la figura), se observan dos comportamientos. Para caudales bajos del Alegría (aproximadamente por debajo de los 25 m³/s), el porcentaje desviado aumenta a medida que aumenta el caudal de entrada del Zadorra. Sin embargo, para caudales por encima de los 25 m³/s de entrada en el Alegría, el porcentaje desviado disminuye a medida que aumenta el caudal de entrada del Zadorra.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.1. Influencia de los caudales de entrada al sistema en su comportamiento

Tal como se puede observar en la Figura 41, el cauce de alivio trabaja incluso con caudales de entrada al sistema reducidos. En general presenta un buen rendimiento para caudales que se podrían considerar normales en un episodio de inundación:

- Para caudales del Zadorra⁸ de 85 m³/s, el cauce de alivio trabaja como mínimo llevándose un 40% del total. Este caso se corresponde a un caso de caudal nulo en el Alegría, que parece poco probable. A poco que el Alegría lleve un poco de agua, este valor aumenta considerablemente.
- Para combinaciones de caudales tales que en Abetxuko⁹ el Zadorra supera los 100 m³/s, el cauce de alivio se lleva entre un poco más del 40% y el 100% del agua del Zadorra, en función del caudal de entrada del Alegría (ver Figura 42). Para un caso de inundación en que el Zadorra transporta 60 m³/s (y por tanto el Alegría lleva un mínimo de 40 m³/s), se puede observar como el cauce de alivio se lleva entre un 50 y un 60% del caudal del Zadorra, reduciendo en gran medida el flujo de agua en la periferia norte de Vitoria.

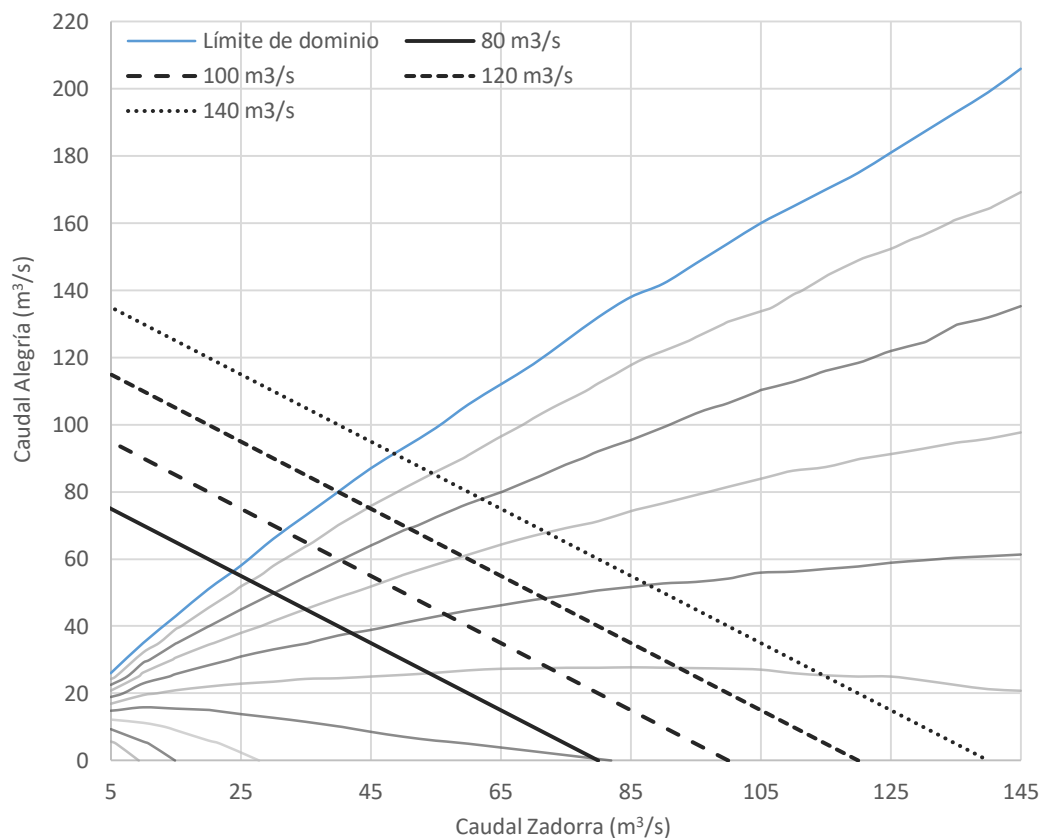


Figura 42. Detalle de las isolíneas del caudal desviado al cauce de alivio, sobre el que se superponen varias isolíneas de la suma de las aportaciones de Zadorra y Alegría.

⁸ En los últimos episodios de inundación recopilados en la Tabla 2, el embalse de Ullíbarri-Gamboa desaguaba un máximo de 60 m³/s. Notar que se han registrado valores superiores a estos 60 m³/s a lo largo de la vida del embalse (en 2003 se llegó a 120 m³/s, por ejemplo).

⁹ En el apartado 2.3.1 se ha correlacionado un caudal de 100 m³/s en el Zadorra en Abetxuko con episodios de inundación en las llanuras de Vitoria.

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

El azud de derivación de la zona de estudio presenta una geometría peculiar respecto a los otros azudes presentes en el Zadorra, al disponer de una abertura en su parte central en lugar de una geometría continua. La existencia de esta abertura abre la puerta a la manipulación de sus dimensiones con objeto de cambiar el “rendimiento” del azud, en el sentido de su capacidad de derivar agua hacia el cauce de alivio. En principio, se espera que para una menor abertura, el obstáculo al flujo del agua aguas abajo por el cauce natural del Zadorra sea mayor, y por tanto aumente el flujo de agua hacia el cauce de alivio. La misma lógica se puede aplicar al caso contrario, en que para una mayor abertura del azud se espera un mayor flujo del agua por el cauce natural, en detrimento del cauce de alivio. El estudio de la influencia de las dimensiones de la abertura en el funcionamiento del azud y el cauce de alivio es el principal objetivo de este apartado. Asimismo, habiendo visto que el Alegría tiene un grado de influencia en el reparto de caudales, se incorpora su aportación como otra variable más a tener en cuenta en el estudio de la abertura del azud.

Para caracterizar la influencia de las dimensiones de la abertura en el comportamiento del azud, se seleccionan dos aspectos del flujo a estudiar, que se desarrollan en los siguientes apartados:

- El propio reparto de caudales, que se evalúa tanto en el modelo unidimensional como en el bidimensional.
- La distribución de velocidades perpendiculares al eje longitudinal del azud. Esta variable se evalúa únicamente con el modelo bidimensional, dada la imposibilidad de obtener los vectores de velocidad en el modelo unidimensional.

Para el estudio de las variables expuestas, se consideran tres casos de abertura del azud, representados en la Figura 43:

- Un escenario base, sin cambios en la abertura. Según su geometría actual introducida en el modelo Hec-Ras, la abertura tiene un ancho de unos 16m aproximadamente, con laterales de 14m de ancho a la izquierda y 26m de ancho a la derecha.
- Un escenario de reducción de la abertura. Dado que la malla en Iber tiene un paso de 4m, se va a considerar una reducción de 4m desde ambos extremos de la abertura. De esta manera, se obtiene una abertura de unos 8m aproximadamente (una reducción del 50% del ancho original), con laterales de 18 y 30m respectivamente.
- Un escenario de ampliación de la abertura. Se considera una ampliación de 4m en ambos extremos de la abertura. De esta manera, se obtiene una abertura de unos 24m aproximadamente (una ampliación del 50% del ancho original), con laterales de 10 y 22m respectivamente.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

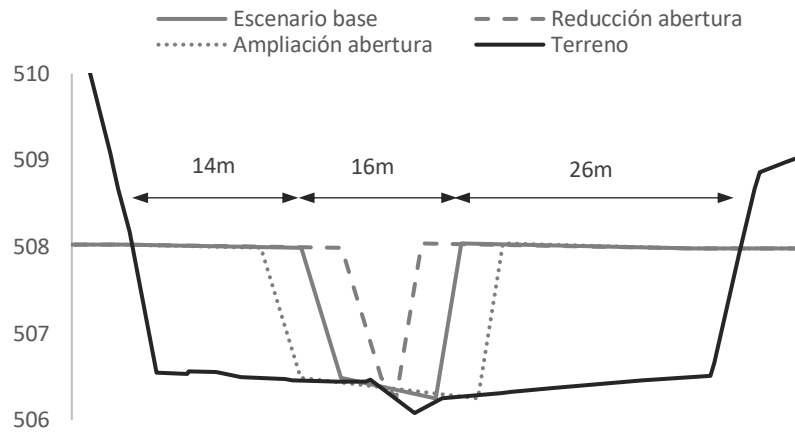


Figura 43. Esquema de la geometría del azud para los diferentes casos considerados, visto desde aguas arriba hacia aguas abajo considerando condiciones de flujo normal en el Zadorra-9.

4.2.1. Variación en el reparto de caudales en el azud para diferentes grados de abertura

En este apartado se pretende estudiar cómo varía el reparto de caudales una vez se modifica la abertura del azud. Para ello, se ejecutan una serie de casos de estudio, con diferentes caudales de entrada en Zadorra y Alegría, y se anota el caudal que se deriva al cauce de alivio. Las diferentes hipótesis de caudales que se usan en el cálculo de los casos de estudio se resumen a continuación. Los valores se resumen en la Tabla 6.

- Para los caudales del Zadorra se toman 7 valores diferentes, comprendidos entre los 15 y los 200 m³/s.
- Para los caudales del Alegría, se escogen 3 conjuntos de valores, todos ellos definidos como un porcentaje del caudal de entrada del Zadorra. Los porcentajes escogidos son un 0%, un 30% y un 60%:
 - El caso del 0% se ha escogido para ver el funcionamiento del azud sin la influencia del Alegría.
 - El caso del 60% se ha escogido combinando dos criterios diferentes, ambos basados en el régimen hidrológico del sistema fluvial Zadorra-Alegría. Por un lado, mediante el cálculo de la relación Alegría/Zadorra para los episodios de inundación de los años 2015 y 2016, que de media da un 60% (los del año 2013 dan un valor medio del 20%, y para el episodio del 2014 no se disponen de datos). Por otro lado, mediante el cálculo del valor medio de este porcentaje para los valores reales medidos por el SAIH desde abril del 2012 hasta setiembre del 2016, que también proporciona un valor cercano al 60%.
 - El caso del 30% se ha añadido como un intermedio entre los dos casos anteriores, para poder caracterizar con mayor precisión la evolución de la influencia del Alegría en el funcionamiento del azud según las dimensiones de su abertura.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

Zadorra (m^3/s)	15	30	50	80	100	120	200
Alegría = 0% Zadorra (m^3/s)	0	0	0	0	0	0	0
Alegría = 30% Zadorra (m^3/s)	4.5	9	15	24	30	36	60
Alegría = 60% Zadorra (m^3/s)	9	18	30	48	60	72	120

Tabla 6. Combinaciones de caudales que se utilizan en el estudio de la variación del reparto de caudales para diferentes aberturas del azud.

Los valores del Zadorra se combinan con los 3 diferentes posibles valores del Alegría.

A la hora de interpretar los resultados, se estudia para cada caso el valor del caudal que se desvía por el cauce de alivio y este mismo valor como porcentaje del caudal de entrada del Zadorra. Los resultados se presentan agrupados en función del grupo de caudales del Alegría considerado, comparando los resultados de los modelos unidimensional y bidimensional para cada caso.

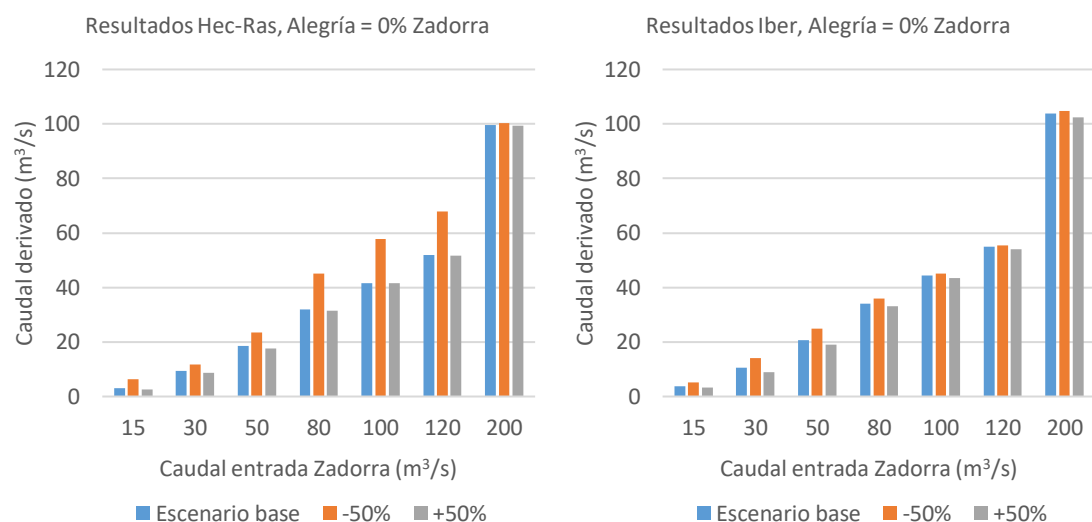


Figura 44. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría nulos y los diferentes escenarios de abertura considerados.

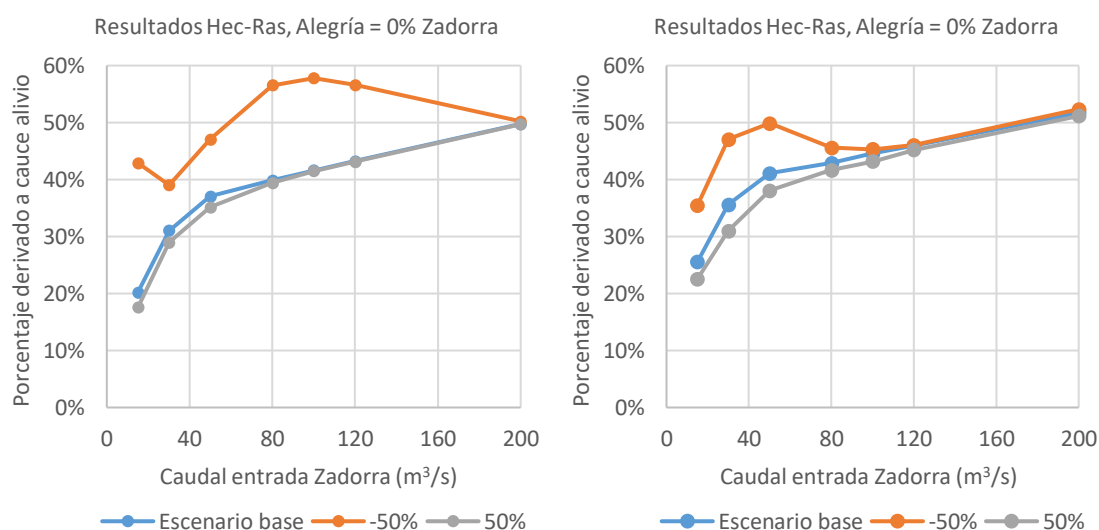


Figura 45. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría nulos y los diferentes escenarios de abertura considerados.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

De la observación de los gráficos de caudal de entrada del Alegría nulo, se pueden observar una diferencia clara entre los dos modelos de cálculo utilizados. El modelo unidimensional sobredimensiona el valor que se deriva al cauce de alivio en el caso de reducción de la abertura del azud, e incluso la forma de la curva *caudal Zadorra-Porcentaje derivado* varía notablemente entre un modelo y otro. Para las otras dos geometrías consideradas, se puede observar cómo Hec-Ras proporciona de forma consistente un caudal en el cauce de alivio ligeramente inferior al de Iber, aunque respetando el mismo comportamiento. Según lo observado en la Figura 45, en el modelo Iber la anchura de la abertura del azud deja de influir en el reparto de caudales a partir de un caudal del Zadorra de aproximadamente 120 m³/s, punto en el que convergen las tres curvas *caudal Zadorra-Porcentaje derivado* de Iber. Sin embargo, debido al errático comportamiento de la curva para el caso de cierre de la abertura en Hec-Ras, no se logra que las tres curvas converjan en el modelo unidimensional hasta un caudal de 200 m³/s.

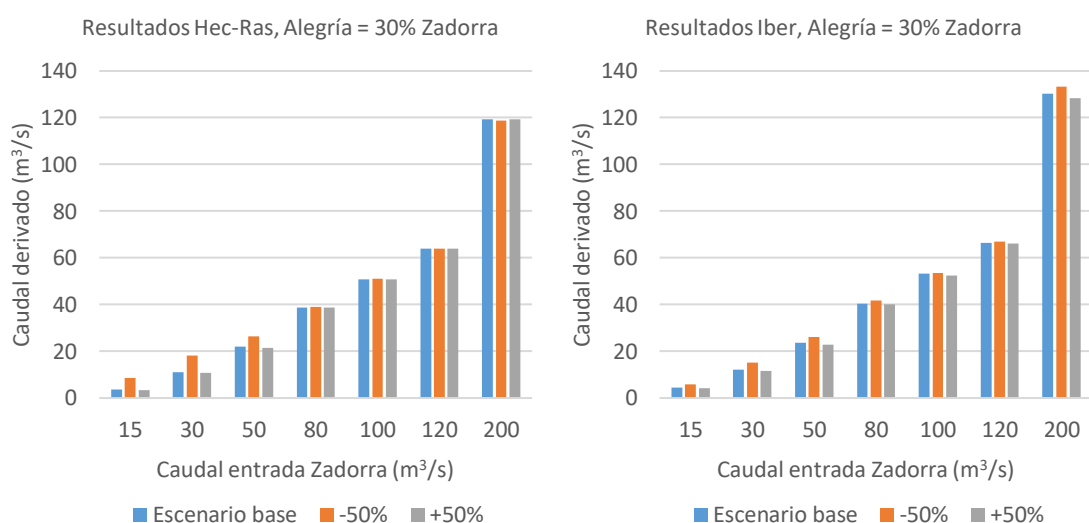


Figura 46. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 30% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.

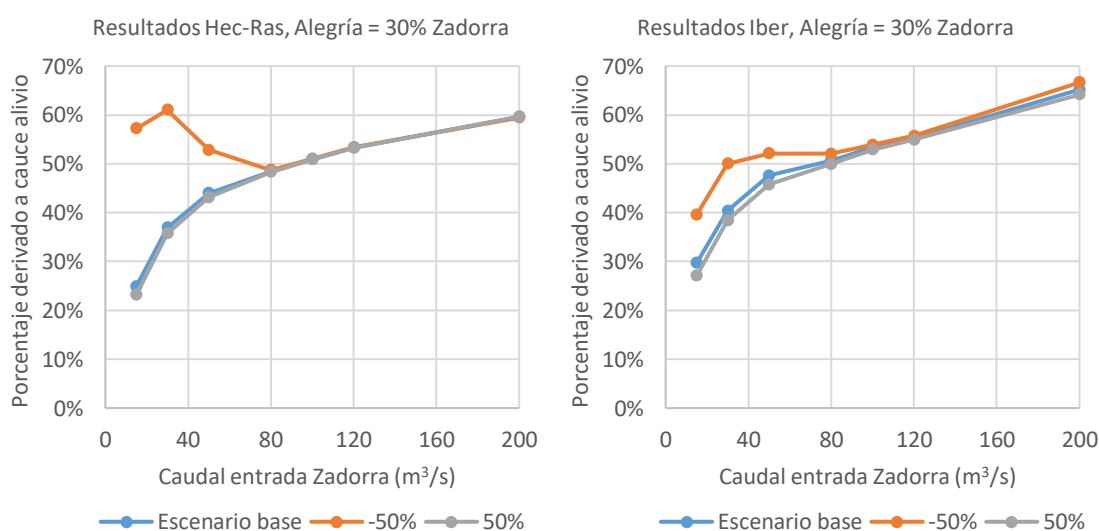


Figura 47. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 30% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

Para los casos en que el Alegría presenta un caudal de entrada equivalente al 30% del caudal del Zadorra, se puede observar cómo el punto de convergencia de las curvas *caudal Zadorra- Porcentaje derivado* se desplaza hacia valores más bajos de caudal en el Zadorra. En cuanto a las diferencias entre Hec-Ras e Iber, esta vez no se observan grandes diferencias en el reparto de caudales, como sí se puede observar en la Figura 44 anterior, en que los caudales para el escenario de reducción de la abertura calculados en Hec-Ras eran netamente superiores a los calculados con Iber. Aun así, la curva *caudal Zadorra-Porcentaje derivado* para el caso de abertura reducida en Hec-Ras sigue teniendo un comportamiento diferente a la de Iber.

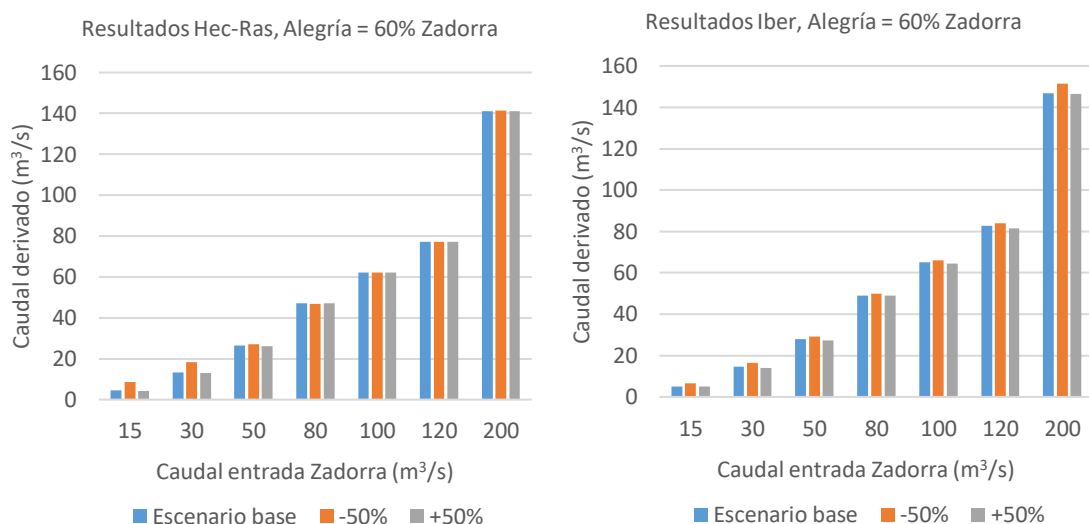


Figura 48. Valores del caudal derivado al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 60% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.

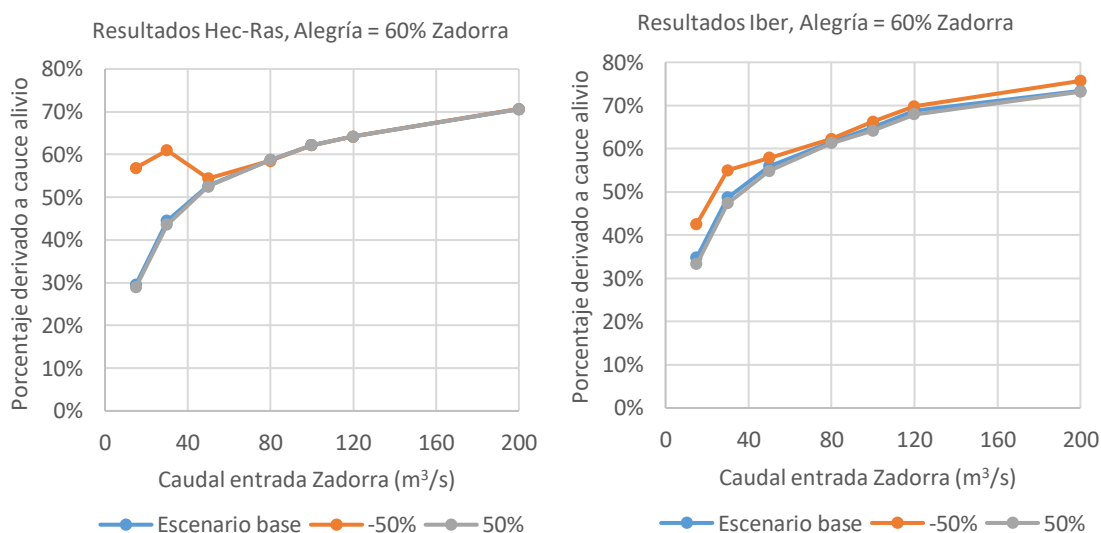


Figura 49. Evolución del porcentaje de caudal del Zadorra que se deriva al cauce de alivio, para caudales de entrada del Alegría equivalentes al 60% de los del Zadorra y los diferentes escenarios de abertura considerados.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

En este último caso, con caudales del Alegría equivalentes al 60% de los del Zadorra, se consolida lo observado para el caso anterior: el punto de convergencia de las curvas *caudal Zadorra- Porcentaje derivado* se desplaza aún más hacia valores más pequeños del Zadorra, y se observan pocas diferencias entre los caudales desviados al cauce de alivio calculados con Hec-Ras e Iber. En este caso la curva *caudal Zadorra- Porcentaje derivado* para el caso de abertura reducida en Hec-Ras también presenta un comportamiento diferente a la de Iber, otro hecho que se ha ido observando para todos los casos de caudales del Alegría ejecutados.

Respecto a la pérdida de influencia del azud que se menciona en el análisis de la Figura 47, se destaca que sólo se refiere al repartir el caudal del Zadorra. Si se quiere estudiar la pérdida de influencia en la circulación del agua, se debe comprobar la diferencia en el nivel del agua aguas arriba y aguas abajo del azud. Si esta diferencia es nula o de valor reducido, entonces sí se puede afirmar que el azud ya no influye en la circulación del agua.

Para realizar esta comprobación, se han tomado los valores de elevación del agua en los puntos extremos del segmento indicado en la Figura 52 con el objeto de calcular la diferencia de nivel aguas arriba y aguas abajo del azud. Este cálculo se ha realizado tanto para la geometría original del azud, como para la geometría modificada con la abertura reducida, dado que ésta es la geometría que más se aleja de la original al repartir los caudales. Los resultados se encuentran en las siguientes tablas.

Caudal entrada Zadorra (m ³ /s)	15	30	50	80	100	120	200
Caudal entrada Alegría (m ³ /s)	0	0	0	0	0	0	0
Diferencia escenario base (m)	0.095	0.129	0.15	0.074	0.055	0.044	0.029
% respecto calado aguas abajo	8%	9%	8%	3%	2%	2%	1%
Diferencia abertura -50% (m)	0.246	0.357	0.382	0.181	0.111	0.083	0.064
% respecto calado aguas abajo	22%	26%	22%	8%	4%	3%	2%

Caudal entrada Zadorra (m ³ /s)	15	30	50	80	100	120	200
Caudal entrada Alegría (m ³ /s)	4.5	9	15	24	30	36	60
Diferencia escenario base (m)	0.069	0.079	0.076	0.029	0.023	0.021	0.045
% respecto calado aguas abajo	5%	5%	4%	1%	1%	1%	1%
Diferencia abertura -50% (m)	0.189	0.247	0.207	0.06	0.045	0.042	0.073
% respecto calado aguas abajo	14%	14%	9%	2%	1%	1%	2%

Caudal entrada Zadorra (m ³ /s)	15	30	50	80	100	120	200
Caudal entrada Alegría (m ³ /s)	9	18	30	48	60	72	120
Diferencia escenario base (m)	0.048	0.044	0.024	0.012	0.02	0.022	0.028
% respecto calado aguas abajo	4%	2%	1%	0%	1%	1%	1%
Diferencia abertura -50% (m)	0.138	0.157	0.077	0.029	0.049	0.063	0.054
% respecto calado aguas abajo	10%	9%	4%	1%	2%	2%	1%

Tabla 7. Valores de la diferencia del nivel de agua aguas arriba y aguas abajo del azud.

Cada tabla se corresponde a un conjunto de valores diferentes del Alegría (0, 30 y 60% respecto al Zadorra). Se indican los resultados para la geometría original del azud así como para la geometría con abertura reducida en un 50%.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

Como se puede observar de las tablas, las dimensiones de la abertura del azud así como los caudales del Zadorra y Alegría tienen una influencia en el comportamiento del flujo del agua. De estas tres variables, la que parece tener una mayor influencia en la diferencia de cota de agua es la abertura del azud. La influencia de cada variable se detalla a continuación:

- Para una menor abertura, se incrementa el valor del desnivel del agua aguas arriba y aguas abajo del azud.
- Para un mayor caudal del Zadorra, se reduce el valor del desnivel.
- Para un mayor caudal del Alegría, también se reduce el valor del desnivel.

En la Figura 50 se observa como los resultados del desnivel parecen converger a valores reducidos a medida que se aumenta tanto el caudal del Zadorra por un lado, como el caudal del Alegría por otro. Respecto a la influencia de las dimensiones de la abertura, se observa como la diferencia en el desnivel es mínima para caudales elevados en Zadorra y Alegría. Por lo tanto, se observa una pérdida de influencia del azud en el flujo del agua a medida que aumentan tanto el caudal del Zadorra como del Alegría. Aun así, aún se observa una influencia mínima de las dimensiones de la abertura para valores elevados de caudal en estos ríos. El comportamiento identificado con los resultados obtenidos refleja la tendencia al anegamiento del azud a medida que aumenta el caudal: es decir, la tendencia a que el azud sea un obstáculo menos significativo para el flujo (que lo controla cada vez menos) cuanto mayor es el caudal que entra al sistema.

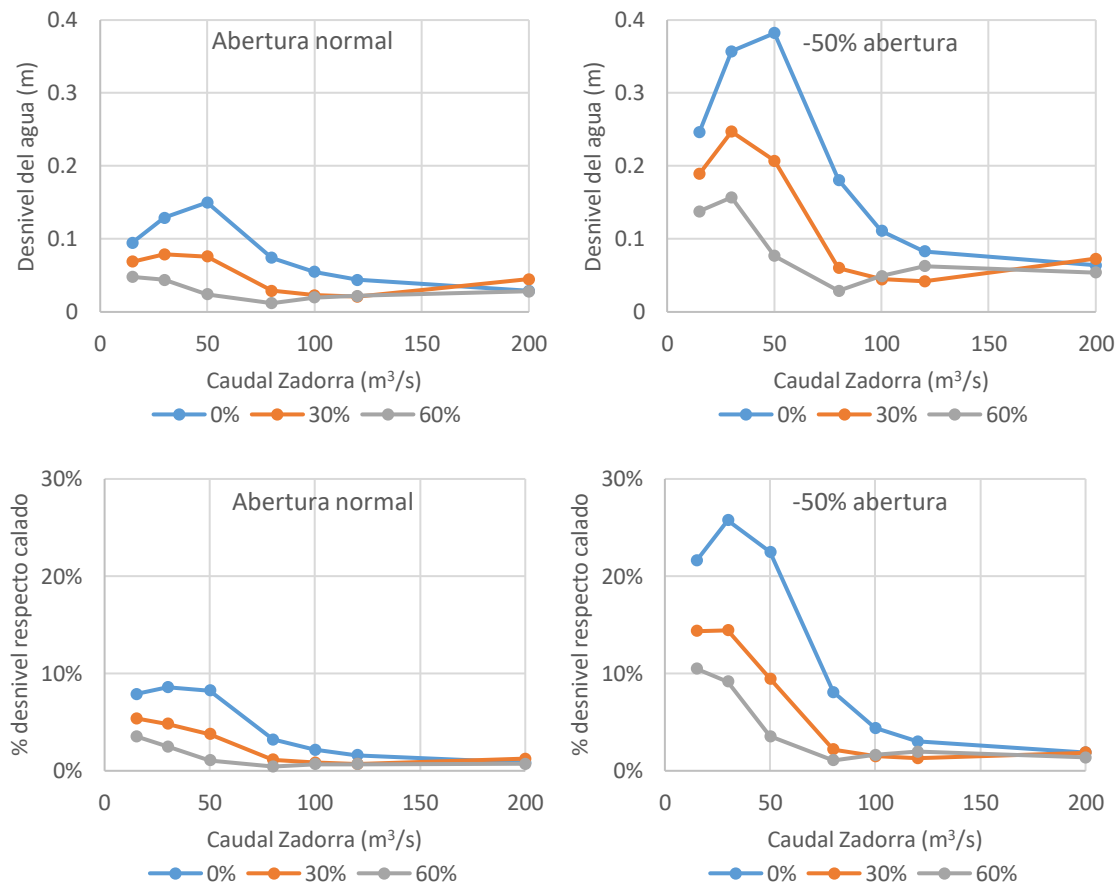


Figura 50. Diferencia de niveles de agua antes y después del azud para dos escenarios de abertura diferentes, tanto en valor absoluto (figuras superiores) como porcentuales (figuras inferiores).

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

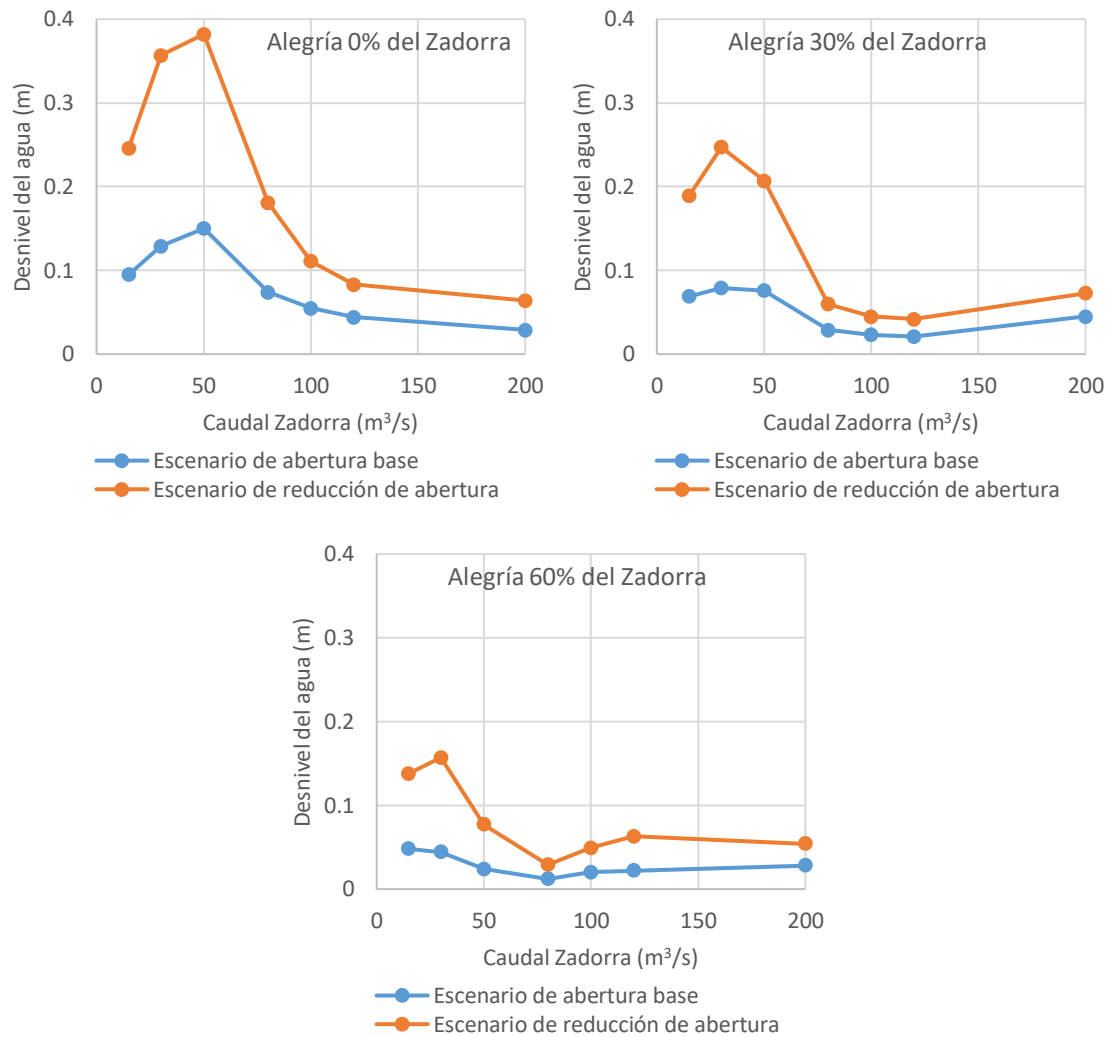


Figura 51. Diferencia de niveles de agua antes y después del azud para los tres conjuntos de valores de caudales del Alegría.



Figura 52. Perfil en el que se evalúa la cota del agua con el objeto de medir la diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo del azud.

Los puntos escogidos para el análisis del desnivel son los extremos del perfil señalado en rojo: entre ellos hay una distancia de 30 metros.

4.2.2. Variación de la distribución de velocidades en el azud para diferentes grados de abertura

El objetivo de este apartado es el de comparar la distribución de velocidades a lo largo del eje del azud para las 3 geometrías que se definen al inicio del apartado 4.2.1, e intentar observar algún patrón que relacione modificaciones en la abertura del azud con variaciones en los perfiles de velocidad. Para ello, se trabaja con los mismos casos de estudio que se definen en la Tabla 6.

La distribución de velocidades que se estudia se corresponde con las componentes perpendiculares al eje del azud. Para obtener estas componentes perpendiculares, se necesita conocer el ángulo que forma el azud con la horizontal así como las componentes horizontal y vertical de los vectores velocidad sobre el azud. El ángulo que forma el azud se obtiene de la malla introducida en Iber, y las componentes de los vectores velocidad las proporciona Iber como resultados consultables.

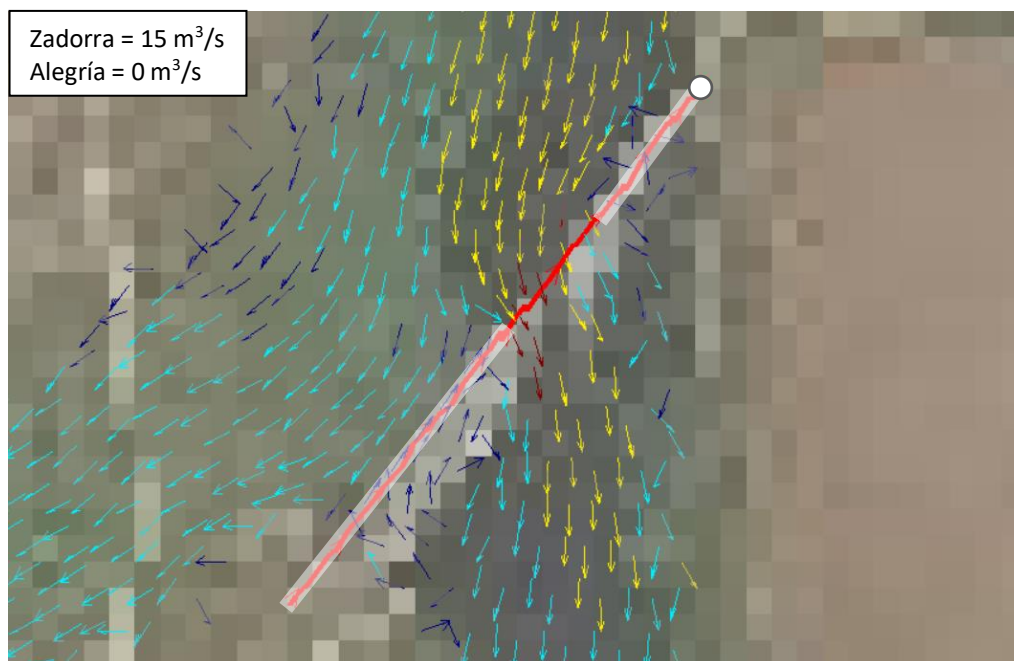


Figura 53. Representación del eje (línea roja) en el que se han tomado los valores de las componentes horizontal y vertical de la velocidad sobre el azud.

Se representa un caso de bajo caudal de entrada del Zadorra y caudal nulo del Alegría. Se han sombreado en blanco los laterales del azud, para resaltar la abertura en el centro, y se indica en blanco el punto de origen de los gráficos que se presentarán a continuación. Se han representado los vectores con una escala de colores en función del módulo de su velocidad.

Una vez se han ejecutado los diferentes casos de estudio seleccionados y se han comparado los resultados para las diferentes geometrías, se pueden identificar tres tipos de distribuciones de velocidades en el azud:

- 1) Una distribución claramente marcada por las dimensiones de la abertura.
- 2) Una distribución en la que no se distingue con claridad ninguna influencia de las dimensiones de la abertura.
- 3) Una distribución a medio camino entre las dos anteriores, con perfiles diferentes en función de las dimensiones de la abertura, pero sin un patrón que permita identificar a que geometría corresponde cada perfil.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

A continuación se mostrarán una distribución de velocidades típica de cada tipo identificado, junto con una descripción del comportamiento observado en sus perfiles. En la Tabla 8 se indica el tipo de distribución de velocidades que adopta cada uno de los casos de estudio considerados.

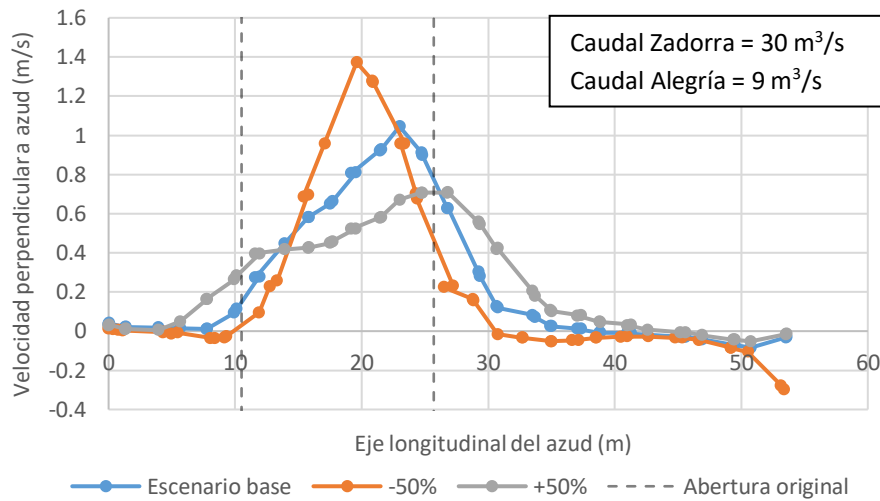


Figura 54. Representación de una distribución de velocidades de tipo 1. Se pueden diferenciar los perfiles de las diferentes geometrías. El origen del eje de abscisas es el margen izquierdo del azud. La abertura señalada es la original: los otros casos siguen lo indicado en la Figura 43.

La distribución de velocidades identificada como de tipo 1 muestra tres perfiles bien diferenciados, en función de la geometría del azud. Se puede observar como a menor anchura de la abertura del azud se obtiene un pico del valor de las velocidades más estrecho a la vez que elevado. A medida que la anchura va aumentando, este pico se va ensanchando y reduciendo. En los extremos del azud la velocidad perpendicular a su eje es nula, hecho que indica que la lámina de agua no logra alcanzar la cota máxima del azud y por tanto no se produce flujo de agua por encima de él. Aun así, hay algunos casos en que el patrón es el mismo, pero en los márgenes se detectan pequeñas velocidades, que indica que el agua empieza a desbordar el azud. En general estos casos sólo se observan para combinaciones de caudales pequeños (en general caudales menores a 50 m³/s en el Zadorra).

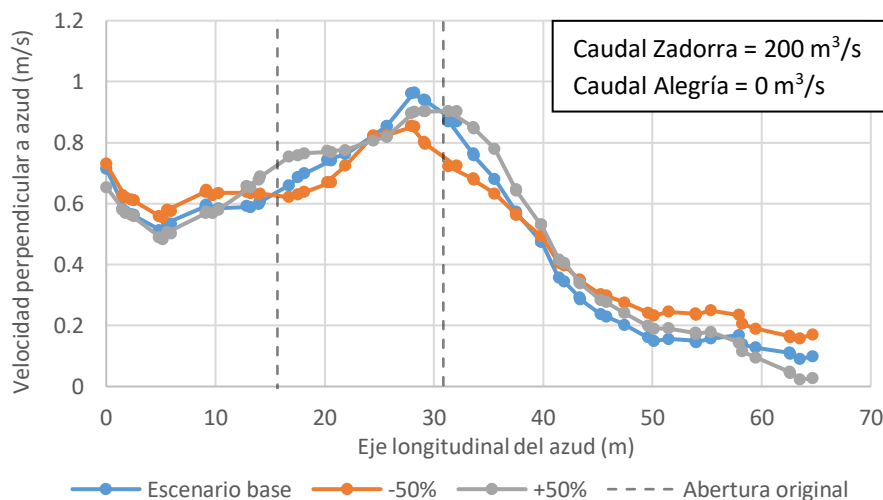


Figura 55. Representación de una distribución de velocidades de tipo 2. Apenas se pueden diferenciar los perfiles de las diferentes geometrías.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

Para la distribución de velocidades de tipo 2, la identificación de cada perfil ya no es tan directa como en el caso anterior. En general, los perfiles son bastante coincidentes, y sólo con una observación detenida se puede detectar el pico de velocidad allá donde se ubica la abertura del azud. Dicho pico mantiene la propiedad de anchura variable en función de las dimensiones de la abertura, con picos más anchos a mayor abertura. Aun así, la altura que alcanza el pico apenas varía de una geometría a otra y su funcionamiento parece diferir al del caso anterior (el mayor pico ya no se corresponde a la menor anchura). Esta diferencia seguramente está causada por el hecho de que el agua ya fluye por encima del azud (ver Figura 56). En este caso, el perfil correspondiente a la menor abertura del azud presenta el pico de menores dimensiones, pero lo compensa con unas mayores velocidades en los márgenes del azud. Los otros dos perfiles son bastante coincidentes, y por lo general se observa como el pico más elevado se corresponde siempre al de la geometría original. En general este tipo de distribución se da para combinaciones de caudales de cierta magnitud (en general entre 80 y 120 m³/s para el Zadorra).

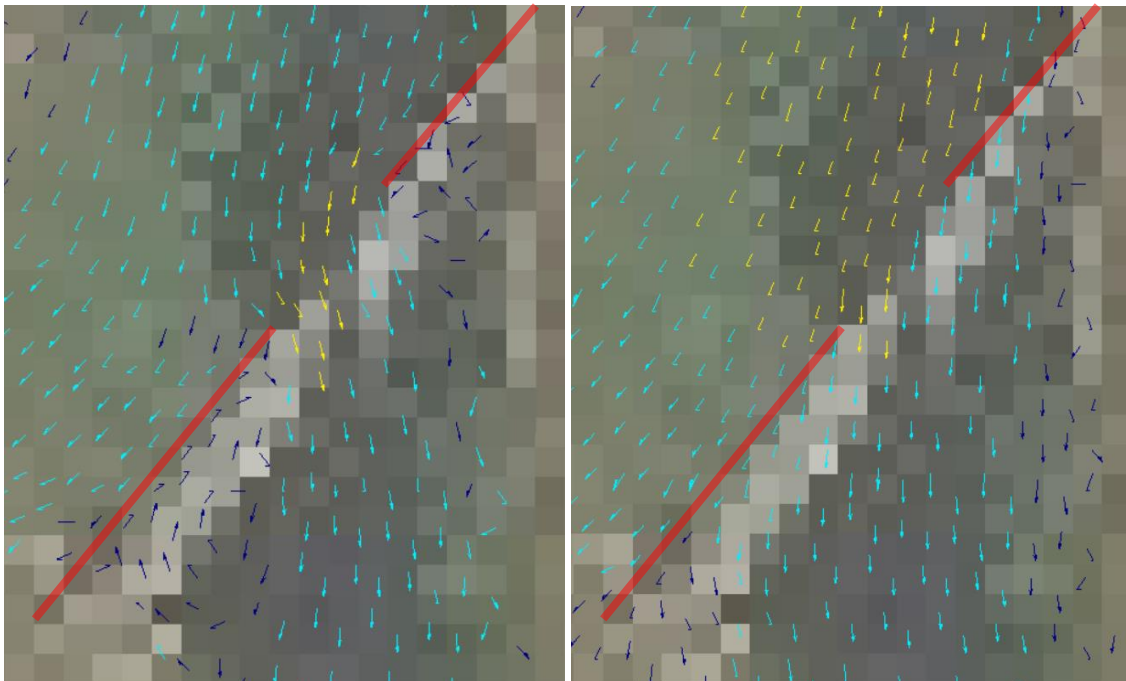


Figura 56. Representación del campo de vectores por encima del azud para un caso de perfil de tipo 1 (izquierda) y tipo 2 (derecha).

Se puede observar cómo en el primer caso el agua sólo fluye a través de la abertura del azud, mientras que en el segundo fluye indistintamente por encima de todo el azud, especialmente en el margen izquierdo. En rojo se indica la posición aproximada de los laterales del azud.

Por último, se identifica un tipo 3 de distribución de velocidades. En estos casos, no se sabe explicar la forma que adoptan los perfiles para las diferentes geometrías. Aun así, sí que se sigue observando una correlación entre la anchura de los picos de cada perfil con la anchura de la abertura del azud. Estos casos se dan para las combinaciones de caudales con los valores más elevados de todos los casos estudiados.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría

4.2. Influencia de la abertura del azud en su funcionamiento

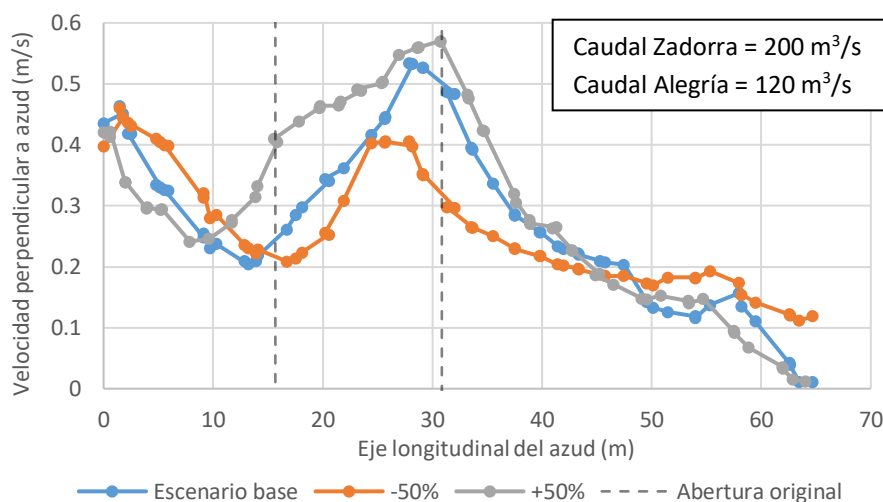


Figura 57. Representación de una distribución de velocidades de tipo 3.
Los perfiles de las distintas geometrías no se confunden, pero tampoco se sabe explicar su comportamiento.

Un fenómeno que se da en todos los perfiles estudiados es el de la ligera desviación hacia la derecha del pico del perfil de velocidad respecto a la abertura del azud. Esto se debe al ángulo entre la dirección del campo de velocidades cuando cruza el azud, y la dirección del eje sobre el que se representan los perfiles de velocidad (que es el del azud mismo). El pico de los perfiles coincidiría con el centro de la abertura si ambas direcciones fueran perpendiculares entre ellas.

Otro aspecto que comparten sólo los perfiles en que el azud se ve inundado es que se produce una mayor circulación de agua a través de la parte izquierda que a través de la parte derecha del azud: esto se debe a que el agua que llega a la parte derecha continúa de forma natural su trayectoria por el cauce de alivio. De esta manera, el agua sigue una trayectoria casi paralela al eje del azud de derivación (ver Figura 56), y por lo tanto la componente perpendicular de la velocidad del agua a través de la parte derecha del azud es menor que en la parte izquierda, donde el ángulo entre dirección de flujo y eje del azud es mayor.

A modo de recapitulación, se concluye que existe una influencia de la apertura del azud en la distribución de velocidades sobre el mismo, influencia que se puede caracterizar en función de la combinación de caudales de entrada al sistema. En la Tabla 8 se muestran las diferentes combinaciones de caudales que se han calculado junto con la clasificación de sus perfiles de velocidad.

Zadorra (m³/s)	15	30	50	80	100	120	200
Alegría = 0% Zadorra (m³/s)	0	0	0	0	0	0	0
Alegría = 30% Zadorra (m³/s)	4.5	9	15	24	30	36	60
Alegría = 60% Zadorra (m³/s)	9	18	30	48	60	72	120

Tabla 8. Clasificación de los casos de estudio en función del tipo de distribución de velocidades que presentan.

Las distribuciones de tipo 1 se marcan en gris, las de tipo 2 en azul, y las de tipo 3 en rojo.

4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio

La motivación detrás de la construcción del cauce de alivio era la reducción de la peligrosidad ante inundaciones en la periferia norte de Vitoria, entre la confluencia del Zadorra con el Alegría y el puente de Gamarra. La implementación de dicho cauce plantea una serie de interrogantes, que se pretenden abordar con una breve comparación del funcionamiento de la zona de estudio antes y después de su implementación:

- La implementación local del cauce de alivio¹⁰ podría producir cambios en la dinámica del río aguas abajo de la confluencia de los dos ramales en que se desdobra el Zadorra, que podrían a su vez afectar al resto de la periferia norte de Vitoria. El principal efecto que podría causar una obra de este tipo es la aceleración del flujo aguas abajo del punto de confluencia, debido a la mayor pendiente del cauce desdoblado (que salva la misma diferencia de cota que el cauce original pero en una menor distancia). Para determinar la existencia de efectos de este tipo, se estudia el perfil de velocidades aguas abajo de la confluencia de los dos ramales del Zadorra.
- La efectividad de la obra de defensa al reducir la peligrosidad de inundaciones en la periferia norte de la ciudad. Para estudiar este aspecto, se plantea un estudio de las diferencias en el nivel de agua a lo largo del cauce original del Zadorra así como de la diferencia en extensión de la mancha de agua en la misma zona.

Para el estudio de estos interrogantes se utilizan ambos modelos disponibles, tanto Hec-Ras como Iber. Para simular la ausencia del cauce de alivio, en Hec-Ras hay suficiente con eliminar este ramal junto con el azud de derivación. En Iber se ha tenido que modificar la malla original para poder eliminar el cauce de alivio y convertirlo en el campo de cultivo que era antaño, tal como se explica al final del apartado 3.3.3. Aunque la modificación hecha en Iber puede resultar un poco “burda” (al asignar una elevación constante a todo el cauce de alivio), es efectiva al derivar la gran cantidad del agua al cauce natural del Zadorra e impedir el flujo por el cauce de alivio.

Con el objeto de valorar únicamente la influencia del cauce de alivio en el funcionamiento de todo el sistema, se deciden estudiar combinaciones de caudales en que el Alegría tenga un valor nulo. Así pues, los caudales que se usan en este estudio son los mismos que en el de la influencia de la abertura del azud (ver Tabla 6, caso de Alegría = 0% Zadorra).

4.3.1. Estudio de las velocidades aguas abajo de la confluencia *Zadorra-cauce de alivio*

El estudio de las velocidades tiene su importancia para determinar si la construcción del cauce de alivio puede haber acelerado el flujo aguas abajo de la confluencia de los dos ramales del Zadorra. Este aumento de la velocidad podría aumentar la peligrosidad del río aguas abajo¹¹, como efecto colateral de la reducción de la peligrosidad de inundación en el tramo de actuación.

¹⁰ El cauce de alivio sólo desdobra un tramo de 1.5 km del Zadorra, por los más de 13 km totales en que el Zadorra recorre la periferia norte de Vitoria (desde el azud de derivación, hasta el pueblo de Margarita).

¹¹ La velocidad, junto con el calado, es uno de los factores con los que se define la peligrosidad de un episodio de inundación (se consideran peligrosas velocidades por encima de 1 m/s, calados por encima de 1 m, o una combinación de calados y velocidades que superen los 0.5 m²/s).

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio

Para la evaluación de las velocidades se ha escogido la sección representada en la Figura 58. Esta elección resulta problemática en Hec-Ras: al estar ubicada aguas abajo de la confluencia, en ambos casos el caudal asignado a esta sección es el mismo, y por tanto el programa no computa ninguna diferencia entre el caso con y el caso sin cauce de alivio. Por este motivo se ha descartado presentar los resultados obtenidos con el modelo unidimensional.

Por su parte, el modelo Iber no ha presentado ningún tipo de problemas al calcular las velocidades en la sección indicada. Con el fin de ahorrar representar todos los perfiles de velocidad que se han obtenido, se decide representar los resultados con el valor de la velocidad media de la sección. Esta velocidad media se ha obtenido como la división entre la integral bajo la curva de velocidades y el ancho de la lámina de agua en la sección. Los resultados que se han obtenido con este modelo se presentan en la Tabla 9.

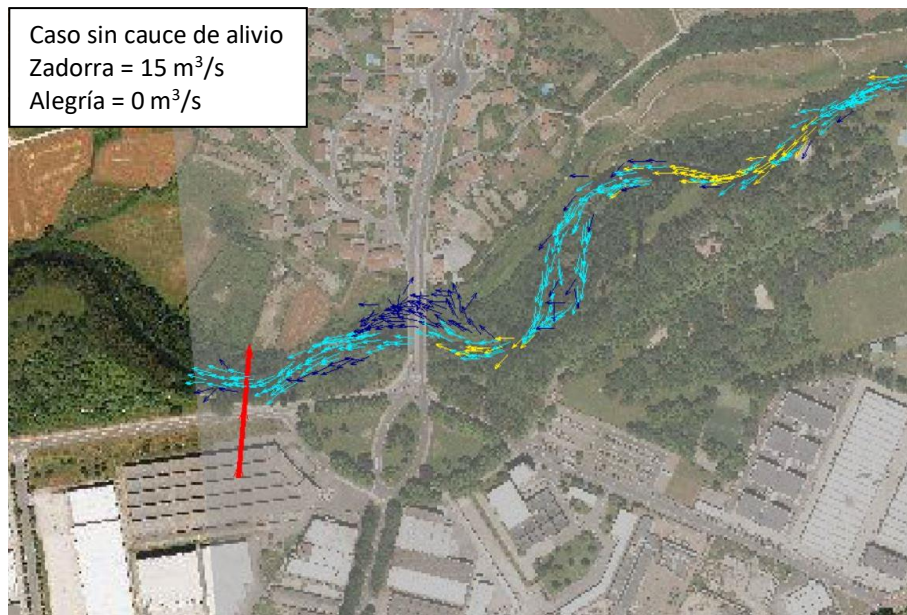


Figura 58. Sección en que se han estudiado los perfiles de velocidad antes y después de la implementación del cauce de alivio, tanto en Hec-Ras como en Iber. Esta sección se escoge aguas abajo de la confluencia entre ambos ramales, pasado el puente de Gamarra (que se recuerda que no está incluido en los modelos). Los vectores indican el campo de velocidades: su magnitud está indicada según el código de colores.

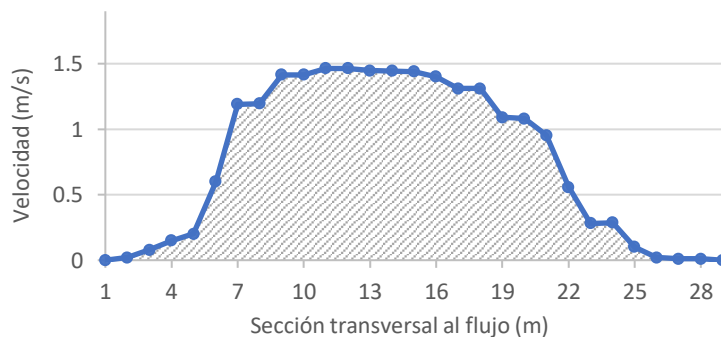


Figura 59. Ejemplo de un perfil de velocidades de Iber y cálculo de su velocidad media en la sección. A partir de los valores discretos de la velocidad (puntos azules), se calcula el área bajo la curva que forman estos puntos (área gris). El ancho de la lámina de agua se define como la distancia entre el primer y el último punto del perfil de velocidades. La velocidad media de la sección se calcula como la división entre el área y el ancho indicados.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio

Zadorra (m ³ /s)	15	30	50	80	100	120	200
Con corta (m/s)	0.52	0.90	1.22	1.69	1.79	2.00	2.40
Sin corta (m/s)	0.50	0.86	1.35	1.69	1.85	2.01	2.48
Diferencia (m/s)	0.02	0.04	-0.13	0.00	-0.06	-0.02	-0.08
Error relativo*	5%	5%	-10%	0%	-3%	-1%	-3%

Tabla 9. Resultados obtenidos en Iber de la variación de las velocidades medias antes y después del cauce de alivio.

*El error relativo se calcula cómo diferencia/velocidad sin corta: de esta manera, se puede saber en qué porcentaje ha aumentado la velocidad con la implementación del cauce de alivio. Un valor negativo indica que la velocidad se reduce en el escenario con cauce de alivio. Se marcan en verde aquellos casos en que el programa otorga un ancho de superficie de agua inferior al observado: por lo tanto, estos resultados de velocidades están sobredimensionados.

Como se puede ver en la Tabla 9, la variación de velocidades es nula o mínima. Aquellos casos en que se observa una mayor variación pueden deberse a un problema en los resultados de Iber, en que el programa no proporciona algunos puntos en los extremos del perfil: esto provoca que el ancho de algunos casos sea inferior (y por tanto su velocidad media sea superior) al de sus respectivos escenarios contrarios. Si se ignoran estos casos, se concluye que la velocidad media aguas abajo de la confluencia apenas varía con la eliminación/introducción del cauce de alivio.

4.3.2. Estudio del nivel de agua en el Zadorra a su paso por la periferia norte de Vitoria

Para el estudio del nivel del agua se han seleccionado una serie de puntos (más o menos equiespaciados y que limitan con la periferia norte de Vitoria) en que medir la diferencia de esta magnitud antes y después de la implementación del cauce de alivio. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 10 (Hec-Ras) y la Tabla 11 (Iber).

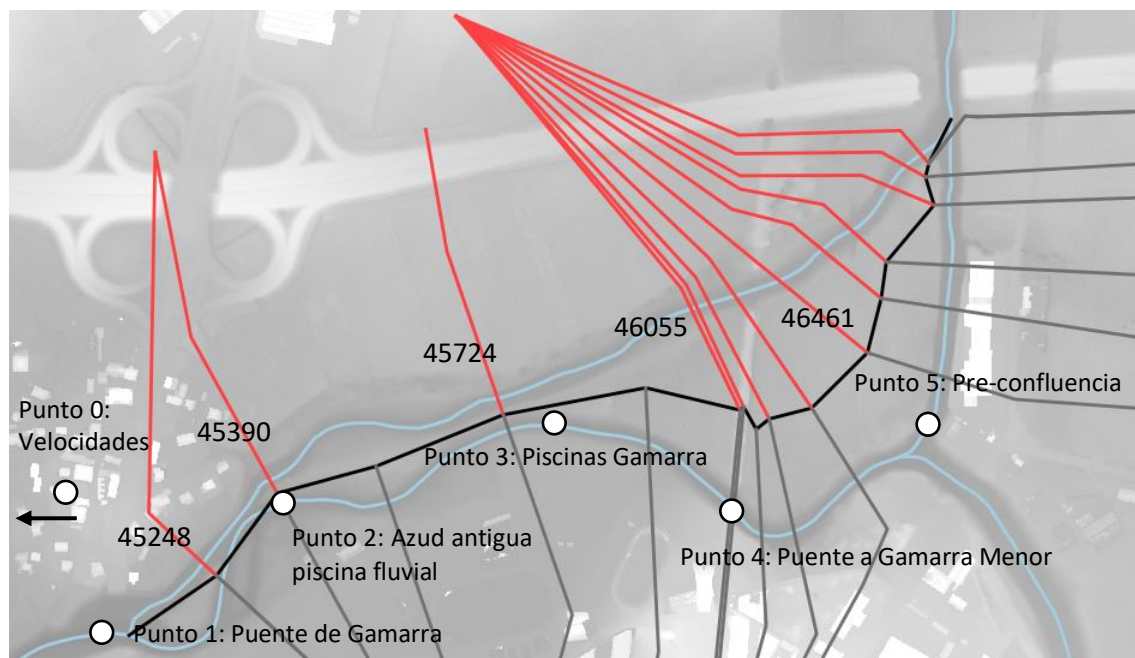


Figura 60. Puntos en que se ha medido el nivel del agua antes y después de la implementación del cauce de alivio.

Se indican las etiquetas de la secciones de Hec-Ras más cercanas a los puntos estudiados en Iber (en este caso las etiquetas se refieren al cauce del Zadorra: más adelante en este estudio aparecerán referidas al cauce de alivio, con otra nomenclatura). El punto 0 se toma en la sección dónde se han calculado los perfiles de velocidades.

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio

Zadorra (m ³ /s)	44869	45248	45390	45724	46055	46461
15	0%	-1%	5%	9%	8%	7%
30	0%	-1%	9%	13%	13%	13%
50	0%	0%	5%	15%	15%	17%
80	0%	0%	-1%	12%	14%	19%
100	0%	0%	-1%	10%	14%	20%
120	0%	0%	-1%	9%	13%	20%
200	0%	0%	-1%	8%	11%	20%

Tabla 10. Variación entre los niveles antes y después del cauce de alivio dividida por el calado de agua antes del cauce de alivio, obtenida en Hec-Ras.

De esta manera, se puede saber en qué porcentaje se ha reducido el calado con la implementación del cauce de alivio. Un valor negativo indica que el nivel del agua es superior en el escenario con cauce de alivio.

Zadorra (m ³ /s)	Punto 0	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
15	1%	1%	7%	11%	10%	9%
30	0%	-1%	12%	15%	15%	17%
50	0%	0%	15%	19%	18%	22%
80	0%	-1%	15%	19%	19%	23%
100	-2%	-5%	12%	18%	18%	23%
120	0%	-2%	15%	18%	18%	22%
200	-1%	-3%	10%	14%	14%	18%

Tabla 11. Variación entre los niveles antes y después del cauce de alivio dividida por el calado de agua antes del cauce de alivio, obtenida en Iber.

De esta manera, se puede saber en qué porcentaje se ha reducido el calado con la implementación del cauce de alivio. Un valor negativo indica que el nivel del agua es superior en el escenario con cauce de alivio.

Se observa que la influencia del cauce de alivio en la diferencia de niveles de agua es prácticamente inapreciable en la zona próxima a la confluencia entre los dos ramales del Zadorra. Sin embargo, a medida que se remonta aguas arriba hacia la confluencia del Alegría se puede observar cómo se van consiguiendo porcentajes de reducción del calado del agua significativos, alcanzando (en Hec-Ras) o superando (en Iber) valores del 20%. En la sección más aguas abajo (la 44869, o punto 0 en Iber) se puede ver cómo en Hec-Ras no se aprecia ninguna influencia del cauce de alivio: esto es así porque en esta sección ambos casos comparten el mismo caudal de entrada del Zadorra. Comparando los resultados de ambos modelos, se puede observar cómo los efectos del cauce de alivio tardan más en notarse en Hec-Ras que en Iber.

Para hacerse una idea del significado de estos valores, en la Figura 61 se representa la mancha de inundación del caso de un caudal de 200 m³/s en el Zadorra obtenida con Iber. Cómo se puede observar en la figura, un 18% de reducción del calado es suficiente para que el río deje de inundar la totalidad del parque de Gamarra. De todos los casos estudiados, este ha sido el único que ha provocado una inundación destacable del margen izquierdo del río: aun así, esto puede deberse a que se ha prescindido de las aportaciones del Alegría, que ha demostrado tener una cierta influencia en el comportamiento del río. Por lo tanto, es de esperar que el cauce de alivio sea útil para caudales menores a 200 m³/s en el Zadorra (para poner en contexto este valor, se recuerda que para un periodo de retorno de 100 años, el caudal del Zadorra es de “sólo” 171 m³/s).

4. Estudio de la zona del cauce desdoblado del Zadorra y su confluencia con el Alegría
4.3. Comparativa del antes y el después de la implementación del cauce de alivio

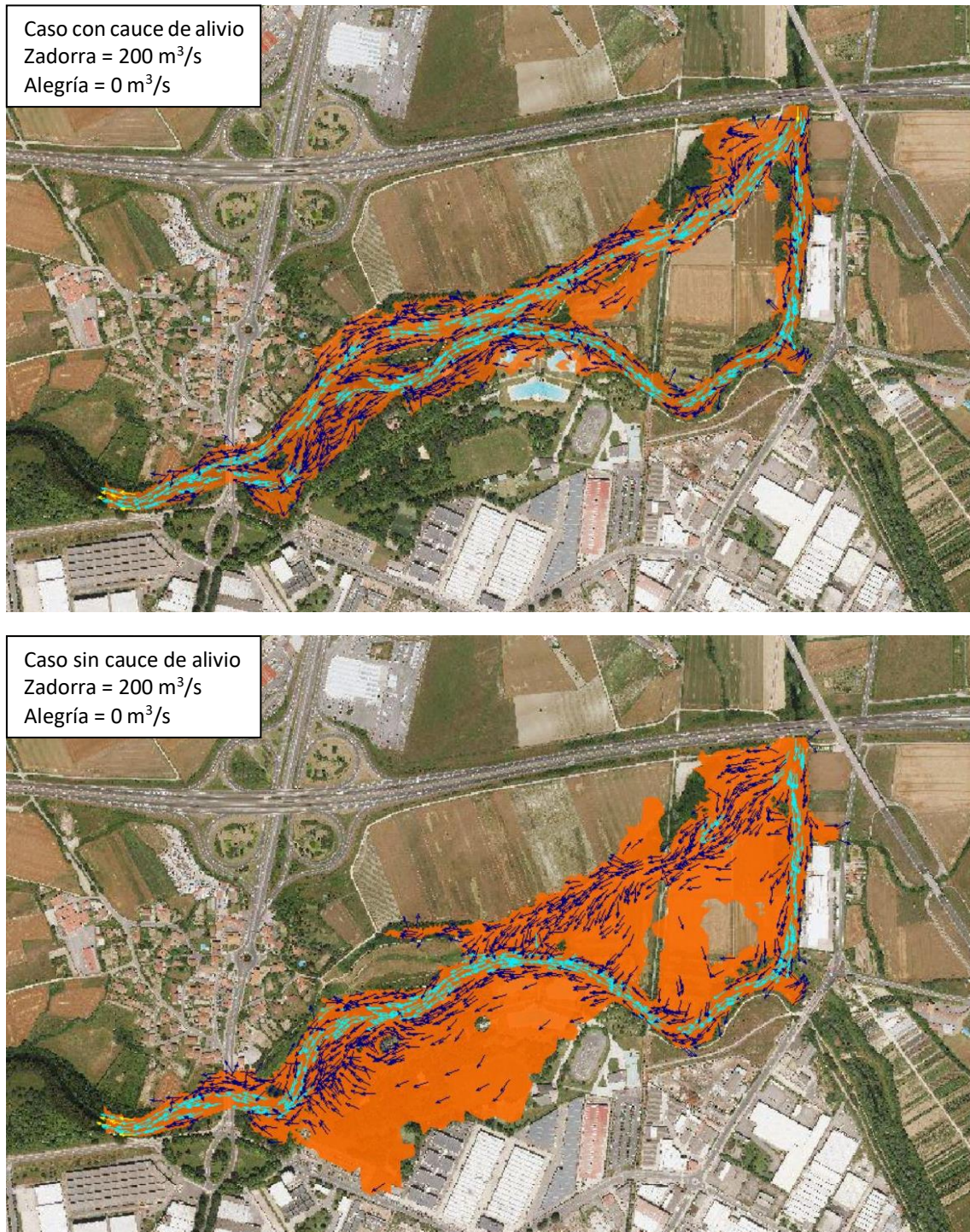


Figura 61. Mancha de inundación de un mismo episodio de crecida del Zadorra para la geometría con cauce de alivio (arriba) y sin él (abajo).

La mancha de inundación se representa en naranja, sobre la que se representan los vectores de velocidad (sólo 1 de cada 20 vectores). La escala de colores de los vectores se corresponde con su módulo, y es la misma en ambas figuras. Se puede observar cómo sólo en la geometría sin cauce de alivio la inundación llega hasta las edificaciones de la periferia norte de la Vitoria: esto muestra el buen rendimiento del cauce de alivio al prevenir inundaciones en esta zona. Aun así, es de esperar que gracias a las aportaciones de agua del Alegría estas inundaciones sean más graves en un episodio de crecida normal del río. También se puede destacar como a pesar de los esfuerzos por eliminar el cauce de alivio en Iber, el agua sigue fluyendo a través de él: como las velocidades y caudales a través del cauce de alivio son muy bajas, se considera que el modelo representa suficientemente bien el escenario previo a su construcción.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio

En el estudio que se realiza en el apartado 4.1 sobre el funcionamiento del azud se observaba cómo los resultados de los dos modelos de cálculo empleados no siempre coinciden. Asimismo, con el uso del modelo bidimensional se observan dinámicas que no se contemplan en el modelo unidimensional, como por ejemplo el trasvase de agua entre los diferentes ramales del sistema fluvial.

Fruto de esta disparidad entre ambos modelos, se decide trabajar en tres frentes para intentar equiparar resultados y comportamiento fluvial entre ellos:

- Estudio de la interacción entre los ramales paralelos (cauce de alivio y cauce natural del Zadorra) en el modelo unidimensional. Se buscan enfoques o maneras de usar este modelo unidimensional para que su comportamiento se asemeje al del bidimensional, y se evalúan los beneficios de cada uno de estos enfoques o soluciones planteados.
- Estudio de la distribución de velocidades para una sección dada en ambos modelos.
- Estudio del impacto de un tratamiento igual de las rugosidades en ambos modelos.

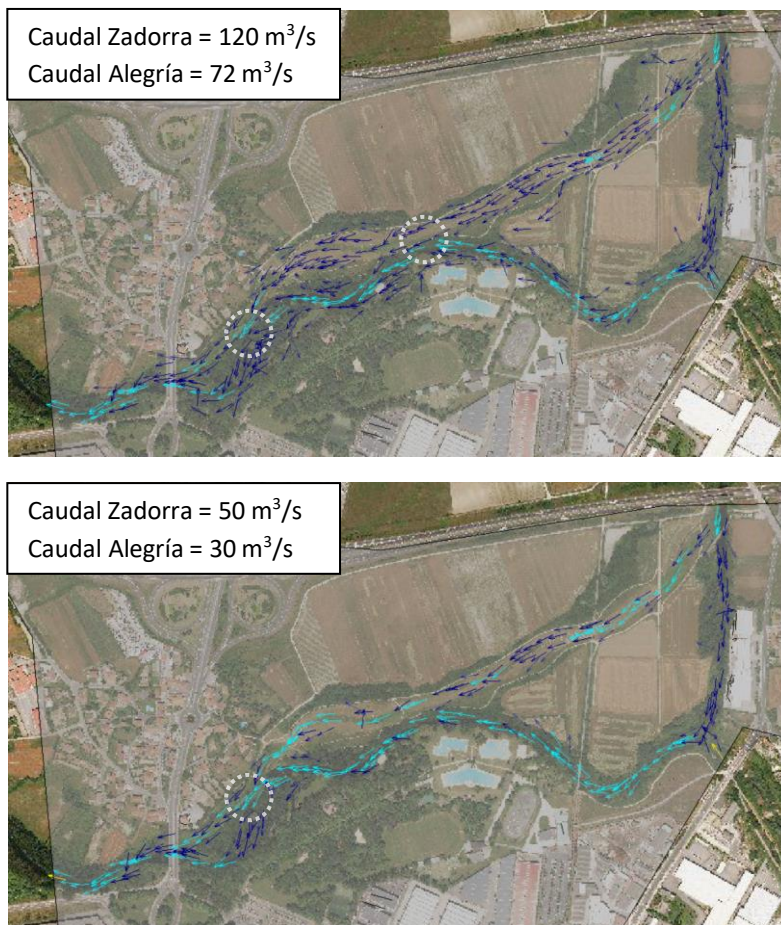


Figura 62. Ejemplos de interacción entre los flujos de los dos ramales paralelos. Esta interacción se puede detectar con el modelo 2D (en los puntos marcados sobre las imágenes, que muestran el campo de velocidades de cada caso), pero sin embargo no se contempla en el modelo 1D: en este modelo es cómo si hubiese una barrera entre ambos ramales que el agua no puede salvar.

5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

En este apartado se pretende estudiar la manera en que Hec-Ras resuelve la disposición paralela y cercana de los dos cauces o ramales en los que se bifurca el Zadorra. En el modelo Hec-Ras, estos dos cauces se introducen de manera independiente, aunque el trazado de las secciones de un ramal tiene continuidad en el siguiente ramal (que está a su lado), tal como se puede observar en la Figura 63. Por lo tanto, cabe esperar que las magnitudes que definen la circulación del agua sean coincidentes en la interfase que separa la sección de un ramal de la sección adyacente del ramal vecino, para aquellos casos en que se produzca interacción entre ambos ramales. Aun así, debido a que en Hec-Ras cada ramal se introduce y calcula de manera independiente, la interfase entre ellos actúa como una especie de muro invisible que el agua no puede superar. Esto provoca que las magnitudes puedan ser diferentes a cada lado de la interfase, aun cuando se supone que deberían ser iguales al describir la misma llanura de inundación. El objetivo de este apartado es determinar el grado en que estas magnitudes de estudio difieren en la interfase, así como proponer y estudiar soluciones que mejoren el comportamiento de Hec-Ras ante este problema.

Se definen las magnitudes a estudiar en la interfase como la velocidad y el nivel del agua. Para este estudio, se comparan estas magnitudes en la llanura izquierda del cauce de alivio con los de la llanura derecha del cauce natural del Zadorra. Esta comparación sólo se hace para aquellos casos en que las láminas de agua superen los obstáculos que puedan encontrarse entre ambos ramales (momento en que se considera que se produce interacción entre ellos).

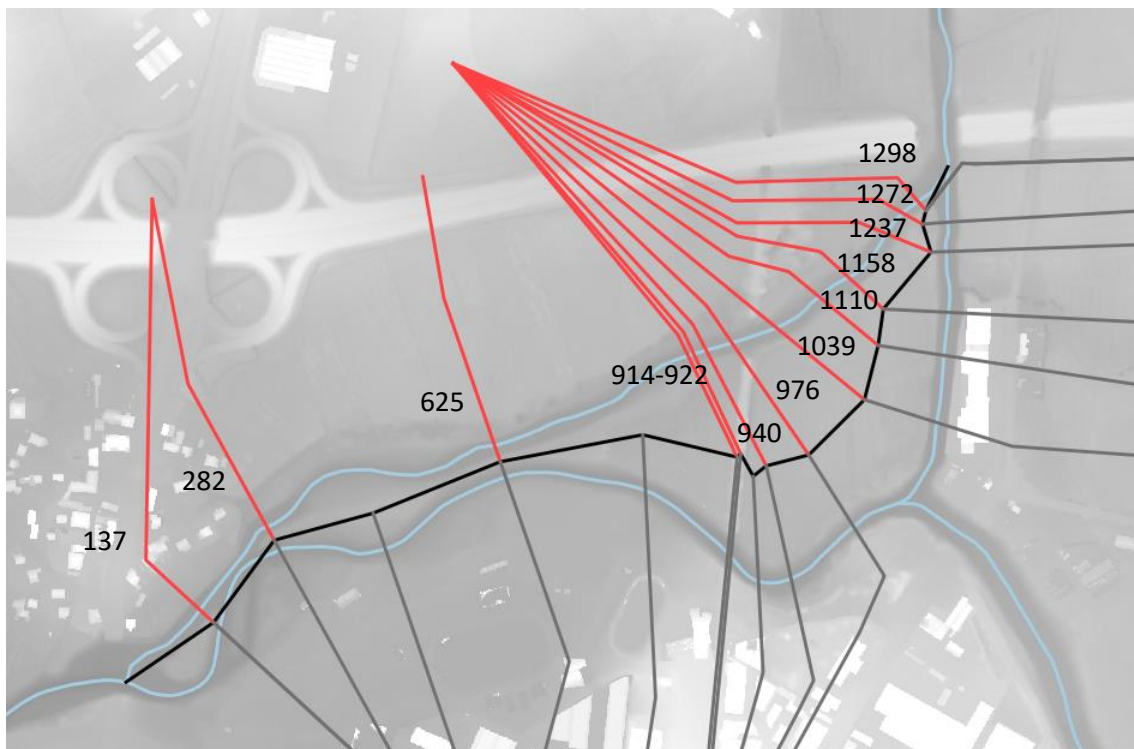


Figura 63. Secciones introducidas en Hec-Ras para caracterizar el cauce de alivio (secciones en rojo) y el cauce natural del Zadorra (secciones en gris).

Se dibujan sobre el Modelo Digital de elevaciones con información detallada de Ríos (MDR). En negro se representa la interfase entre las secciones de ambos cauces, que no parece estar basada en la topografía. Se indica también la etiqueta que tiene cada sección en Hec-Ras, para las secciones del cauce de alivio.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

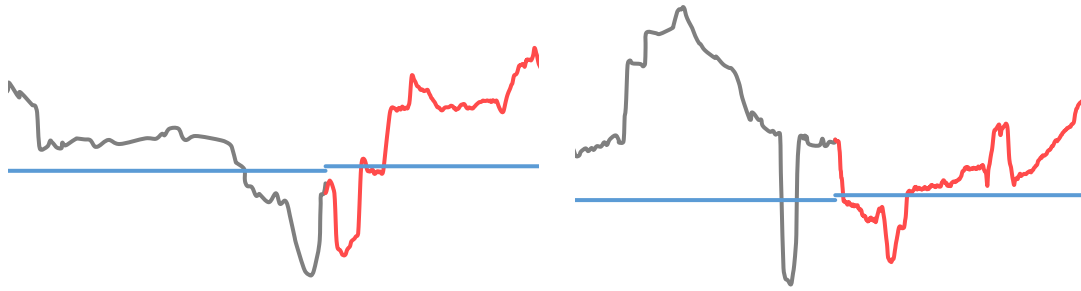


Figura 64. Representación de un par de secciones transversales del cauce natural del Zadorra (gris) con su continuación en el cauce de alivio (rojo), con (izquierda) y sin (derecha) interacción entre ramales. En el primer caso (izquierda), las láminas de agua de ambos cauces superan la topografía entre ellos, y por tanto se considera que se puede estudiar la diferencia de velocidades y nivel de agua entre ambos cauces. En el segundo caso (derecha), la lámina de agua no supera la topografía entre los dos cauces, con lo que no se considera necesario estudiar estas secciones.

Se hace notar que el criterio de selección de secciones a estudiar expuesto en la Figura 64 no está exento de errores. Hay ocasiones en las que las secciones transversales están trazadas de tal manera que entre ambos cauces se interpone una elevación que no representa un obstáculo real al flujo entre ellos.

Un ejemplo de secciones transversales con un trazado desafortunado se muestra en la Figura 65. En ella, se puede observar como una mota perpendicular a ambos cauces (representada como una línea verde en la figura derecha) se confunde con un obstáculo topográfico para el flujo entre los dos ramales paralelos. Si bien la presencia de una mota podría suponer un obstáculo, con la configuración que adopta en la zona de estudio sólo podría obstaculizar el flujo aguas abajo por la llanura de inundación entre los dos cauces (representado con una flecha gris en la Figura 66). Tal como se puede ver en esta Figura 66, dicha mota no supone un obstáculo real al flujo transversal de agua entre los dos cauces (puede circular de uno al otro, se representa con una flecha blanca). Así pues, para el estudio de la interacción entre cauces se descartan los obstáculos topográficos siempre que estos se correspondan al ejemplo mostrado en la Figura 65.

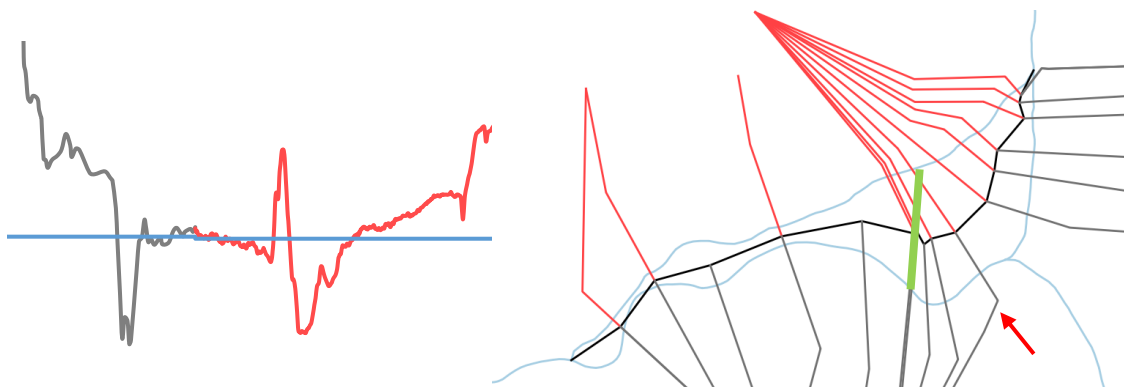


Figura 65. Representación del error que se comete al descartar algunas secciones al estudiar la interacción entre cauces.

En la figura izquierda se muestra una sección transversal en que se aprecia un obstáculo topográfico entre los dos cauces. En la figura derecha se muestra la ubicación de esta sección (flecha roja), así como la ubicación de una mota que va desde el cauce de alivio hasta el cauce natural del Zadorra (línea verde). El obstáculo identificado en la figura izquierda se corresponde a esta mota. En la Figura 66 se argumenta por qué se ha de descartar este obstáculo al definir la interacción entre cauces.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

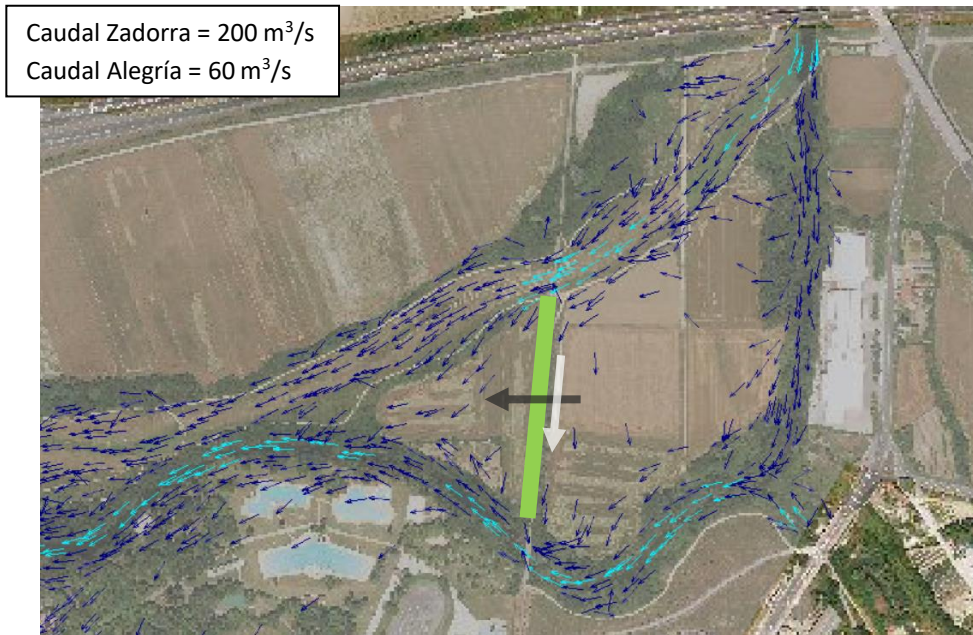


Figura 66. Campo de velocidades obtenido en Iber para el caso representado en la Figura 65. Se representa sólo 1 de cada 25 vectores calculados. La flecha gris indica el flujo que conseguiría obstaculizar la mota (línea verde), mientras que la flecha blanca indica un itinerario que sigue el agua para ir desde el cauce de alivio hasta el cauce natural del Zadorra, paralelo a la mota: se puede comprobar como el obstáculo identificado en la Figura 65 no imposibilita la interacción de agua entre ambos ramales, y por tanto se ha de ignorar.

Los casos que se van a estudiar incluyen la geometría original así como dos estrategias pensadas para intentar simular el comportamiento del modelo bidimensional:

- Geometría 1 (original). Se corresponde a la geometría original de Hec-Ras. Este caso es de interés para entender el grado en que es impreciso el modelo original: en Hec-Ras, un ramal es independiente por completo del otro, no se pasan agua el uno al otro. Hec-Ras calcula el reparto de caudales con la condición de que aguas arriba de la bifurcación la energía por uno y otro ramal sea igual.
- Geometría 1 (caudales Iber). Se corresponde a la geometría original de Hec-Ras, pero imponiendo el cambio del reparto del caudal entre los dos ramales que se ha observado en el modelo bidimensional. Esto incluye cada nuevo reparto de caudales cada vez que el agua cambia de ramal en un desbordamiento: de esta manera se pretende simular los flujos de agua que se observan entre ambos cauces.
- Geometría 2 (confluencia). Se corresponde a una modificación de la geometría original, a la que se le impone un punto de confluencia y bifurcación allá donde se observa un intercambio de agua entre los dos ramales. De esta manera se pretende forzar otro reparto de caudales, simulando la interacción entre ramales que se observa en Iber pero sin forzar el valor de los intercambios de caudal.

En la Figura 67 se muestran ambas geometrías, así como una breve descripción de la diferencia entre la geometría 1 original y la que tiene los caudales de Iber impuestos.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

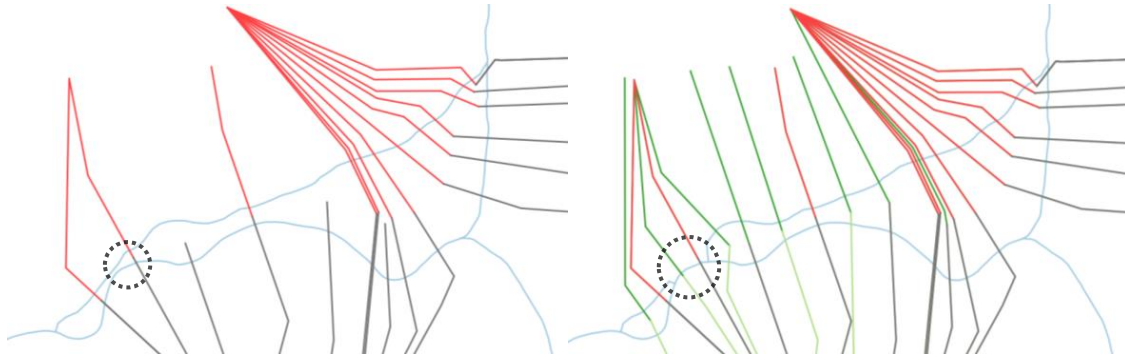


Figura 67. Geometrías sobre las que se comprobarán las magnitudes de estudio en la interfase. En la izquierda se representa la geometría 1, y a la derecha la geometría 2. La diferencia entre los dos casos de la geometría 1 es que en el primero (original) utiliza la herramienta de optimización de caudales, mientras que en el segundo (caudales Iber) se imponen los caudales que se han observado en Iber cada vez que se produce trasvase de agua entre los distintos ramales.

Las combinaciones de caudales que se utilizan en este estudio cuentan con los mismos caudales del Zadorra que se utilizan en el apartado 4.2, pero con distintos caudales del Alegría. Se muestran en la siguiente tabla.

Zadorra (m^3/s)	30	50	80	100	120	200
Alegría (m^3/s)	20	50	70	50	80	100

Tabla 12. Combinaciones de caudales utilizadas en el estudio de las diferencias de velocidad y niveles de agua en la interfase entre el cauce de alivio y el cauce natural del Zadorra.

En este caso tampoco se consideran casos en que la zona de estudio presente un flujo inverso en el Zadorra-9. Esto se debe a que las velocidades en la interfase entre cauce de alivio y cauce natural del Zadorra tendrían sentidos contrarios, cuando deberían ser coincidentes. Esta problemática se representa en la Figura 68.

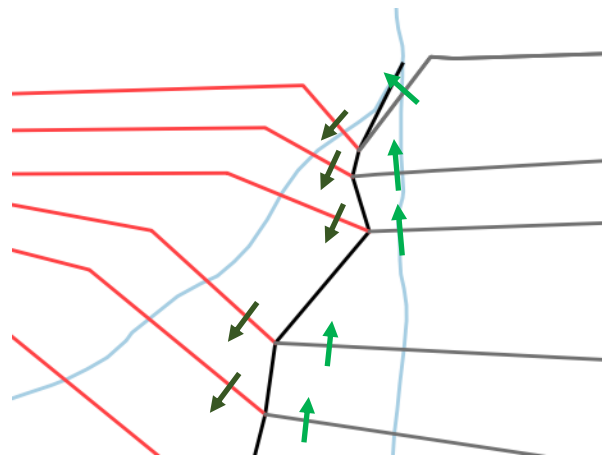


Figura 68. Representación de la inconveniencia de comparar velocidades en la interfase para un caso de funcionamiento inverso.

En verde claro se representan los sentidos de las velocidades del Zadorra-9 (cauce natural del Zadorra), y en verde oscuro los sentidos de las velocidades del cauce de alivio: estos sentidos son opuestos. No tiene sentido comparar calados y velocidades en este caso.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

La evaluación de la diferencia entre velocidades y niveles de agua en la interfase se hace mediante el cálculo del error relativo en velocidades y calados de los extremos de las secciones adyacentes:

$$e_{r,velocidades} = 2 \cdot \frac{|v_{Zad,derecha} - v_{cauce\ alivio,izquierda}|}{v_{Zad,derecha} + v_{cauce\ alivio,izquierda}}$$

$$e_{r,calados} = 2 \cdot \frac{|Z_{agua,Zad} - Z_{agua,cauce\ alivio}|}{(Z_{agua,Zad} + Z_{agua,cauce\ alivio}) - (Z_{talweg,Zad} + Z_{talweg,cauce\ alivio})}$$

Donde:

- $V_{Zad/cauce\ de\ alivio}$ indica la velocidad en el cauce natural del Zadorra o en el cauce de alivio, respectivamente.
- $V_{derecha/izquierda}$ indica la velocidad en la llanura más cercana a la interfase entre los dos cauces. En el caso del cauce natural del Zadorra, se usa el valor de la llanura derecha. En el caso del cauce de alivio, se usa el valor de su llanura izquierda.
- Z_{agua} indica el nivel de la lámina de agua.
- Z_{talweg} indica la cota del punto más bajo del lecho de la sección transversal.
- $e_{r,velocidades}$ es la diferencia de velocidades entre los dos ramales divididos por la media de los dos.
- $e_{r,calados}$ es la diferencia de niveles de la lámina de agua entre los dos ramales divididos por la media de los calados de los dos (calado que se calcula como la diferencia entre nivel de la lámina de agua y la cota del punto más bajo del lecho).

A continuación se presentan los resultados para cada una de las geometrías consideradas.

5.1.1. Geometría 1 (original): geometría original de Hec-Ras

Para el modelo unidimensional original se obtienen unos errores relativos de velocidad elevados, con valores que oscilan desde un 20% hasta un 155% según la sección transversal que se estudie (ver Tabla 13). Para todas las combinaciones de caudales y secciones estudiadas se obtienen velocidades de flujo superiores en el cauce de alivio respecto al cauce natural del Zadorra. Para equilibrar esta diferencia una solución podría ser extender la llanura izquierda del cauce de alivio a costa de la llanura derecha del Zadorra.

En cuanto a los errores relativos en calados, se puede observar cómo estos presentan unos valores comedidos, por debajo del 5%. La diferencia entre cotas de agua se minimiza en los extremos de los cauces: esto se debe a que el propio Hec-Ras impone que la energía en los extremos de ambos cauces debe ser la misma, como parte de su herramienta de optimización de caudales en una bifurcación.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

Sección transversal	Número casos desbordamiento*	Error relativo promedio**		Mayores velocidades
		Velocidades	Calados	
137	4	51.89%	0.64%	C. alivio
282	5	20.38%	2.85%	C. alivio
625	4	41.32%	5.13%	C. alivio
914	0			
922	0			
940	3	57.78%	2.18%	C. alivio
976	0			
1039	0			
1110	0			
1158	0			
1237	0			
1272	2	60.00%	1.47%	C. alivio
1298	3	155.41%	0.73%	C. alivio

Tabla 13. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 1 (original).

En gris se indican aquellas secciones en que se ha ignorado el obstáculo topográfico entre los cauces, de acuerdo a la Figura 65. Se han tachado aquellas secciones en que no hay casos de desbordamiento, y por tanto no tiene valor la comparación. *Respecto a los 6 casos estudiados en la Tabla 12. **Promedio de todos los casos en que hay desbordamiento.

5.1.2. Geometría 1 (caudales Iber): geometría original de Hec-Ras a la que se le imponen los caudales observados en Iber

En este caso se conserva la geometría original del Hec-Ras, pero se sustituye la herramienta de optimización de los caudales en una bifurcación por los caudales que se observan en el modelo bidimensional Iber. Se supone que este modelo se acerca más a la realidad, al representar las transferencias de agua entre los dos ramales.

No obstante, los errores relativos que se obtienen para este caso empeoran los obtenidos en el caso original, tanto de velocidades como de calados. Para este caso se sigue manteniendo que las velocidades más elevadas se encuentran en el cauce de alivio en lugar de en el cauce natural del Zadorra.

Sección transversal	Número casos desbordamiento*	Error relativo promedio**		Mayores velocidades
		Velocidades	Calados	
137	4	74.43%	0.76%	C. alivio
282	5	47.34%	3.77%	C. alivio
625	4	47.60%	7.31%	C. alivio
914	0			
922	0			
940	3	62.90%	3.26%	C. alivio
976	0			
1039	0			
1110	0			
1158	0			

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

Sección transversal	Número casos desbordamiento*	Error relativo promedio**		Mayores velocidades
		Velocidades	Calados	
1237	0			
1272	2	98.08%	2.52%	C. alivio
1298	3	168.81%	3.25%	C. alivio

Tabla 14. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 1 (caudales Iber).

En gris se indican aquellas secciones en que se ha ignorado el obstáculo topográfico entre los cauces, de acuerdo a la Figura 65. Se han tachado aquellas secciones en que no hay casos de desbordamiento, y por tanto no tiene valor la comparación. *Respecto a los 6 casos estudiados en la Tabla 12. **Promedio de todos los casos en que hay desbordamiento.

5.1.3. Geometría 2 (confluencia): modificación de la geometría original a la que se le añade un nuevo punto de confluencia y bifurcación

En este caso se modifica la geometría de Hec-Ras con la idea de añadir un nuevo punto de confluencia y bifurcación allá dónde se observe trasvase de agua en el modelo bidimensional. De esta manera, y gracias a la aplicación de la herramienta de optimización del reparto de caudales en una bifurcación (que se ha explicado antes), se puede añadir un punto dónde los flujos de agua de cada ramal puedan interaccionar e intercambiarse, tal como lo harían en el modelo bidimensional. Para poder construir el tramo común entre los dos cauces se añaden nuevas secciones transversales a lo largo de la parte aguas abajo de ambos cauces. Esto se hace porque el programa requiere un mínimo de dos secciones por tramo de río, y esta condición se incumplía con las escasas secciones transversales que tiene la geometría original. Estas nuevas secciones mejoran asimismo la precisión de los cálculos gracias a la mejor cobertura espacial de la zona.

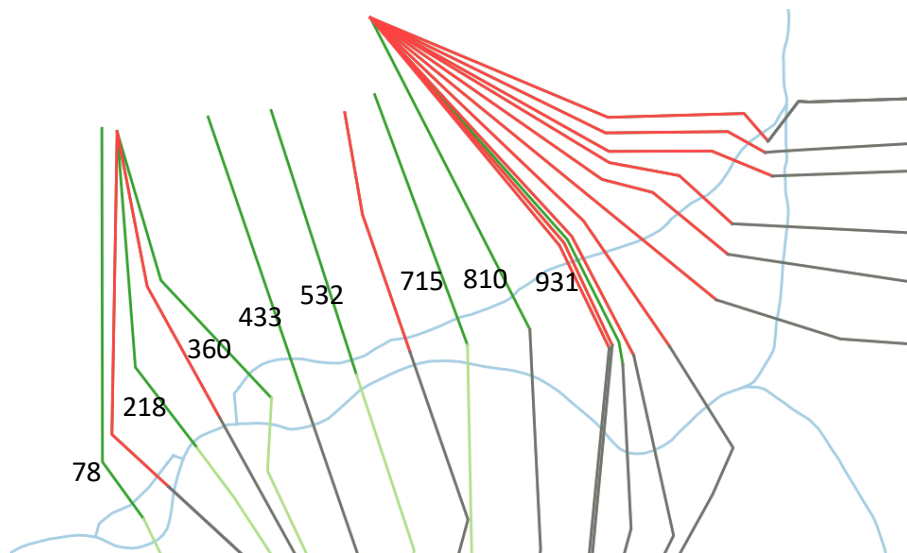


Figura 69. Esquema de la geometría modificada en Hec-Ras.

Se puede observar como en el extremo aguas abajo de la zona de estudio se ha forzado un pequeño tramo común a ambos cauces, en una zona dónde se ha identificado intercambio de agua entre ellos en el modelo bidimensional. De esta manera se consigue forzar una nueva confluencia y bifurcación aguas arriba y aguas abajo del tramo común, permitiendo que el agua se redistribuya en esta zona. Esta geometría también incluye un mayor número de secciones (marcadas en verde fuerte en el cauce de alivio y verde claro en el Zadorra). Se indica la etiqueta que tienen estas nuevas secciones en Hec-Ras, para las secciones del cauce de alivio.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

Sección transversal	Número casos desbordamiento*	Error relativo promedio**		Mayores velocidades
		Velocidades	Calados	
78	3	33.62%	0.59%	C. alivio
137	4	57.10%	0.52%	C. alivio
218	Sección del tramo compartido			
282	Sección del tramo compartido			
360	2	69.97%	0.14%	C. alivio
433	0			
532	3	42.65%	1.33%	Zadorra
625	4	44.04%	2.28%	C. alivio
715	2	47.78%	3.14%	C. alivio
810	3	24.23%	2.45%	Zadorra
914	0			
922	0			
931	1	2.35%	2.86%	C. alivio
940	3	63.24%	2.68%	C. alivio
976	0			
1039	0			
1110	0			
1158	0			
1237	0			
1272	0			
1298	3	162.31%	1.03%	C. alivio

Tabla 15. Errores relativos de velocidades y calados para cada sección del cauce de alivio para el caso geometría 2 (confluencia).

En gris se indican aquellas secciones en que se ha ignorado el obstáculo topográfico entre los cauces, de acuerdo a la Figura 65. En verde se marcan las secciones que se han añadido para construir esta geometría (estas secciones se etiquetan en la Figura 69). Se han tachado aquellas secciones en que no hay casos de desbordamiento, y por tanto no tiene valor la comparación. *Respecto a los 6 casos estudiados en la Tabla 12. **Promedio de todos los casos en que hay desbordamiento.

A pesar de las modificaciones introducidas en la geometría, no se observa una gran mejora en los errores relativos de las velocidades, que oscilan entre casi un 0 y un 160%. En esta ocasión, sí que se detecta una mayor velocidad en el Zadorra que en el cauce de alivio para un par de las nuevas secciones introducidas. En todas las secciones transversales que ya existían en el modelo original se sigue manteniendo que las mayores velocidades se detectan en el cauce de alivio.

En lo que respecta a los errores relativos en los calados, se observa como los valores calculados se mantienen casi todos por debajo del 3%. Gracias a la adición de nuevos puntos de confluencia y bifurcación y a la aplicación de la herramienta de optimización del reparto de caudales, se consigue que este error se mantenga muy bajo en un mayor número de secciones. Aun así, tal como se puede ver en la Figura 70, se obtienen resultados parecidos a los del modelo original, con una única sección donde se consiguen mejoras apreciables (sección 625).

Como nota adicional, indicar que el sentido del trasvase de agua calculado con esta geometría coincide en 5 de los 6 casos con Iber, en que el agua siempre circula del cauce natural al artificial: la magnitud en cambio no coincide, y empeora a medida que aumentan los caudales del sistema.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

5.1.4. Comparación de resultados entre las diferentes geometrías

De la comparativa de los tres casos estudiados, no se observa que ninguna de las dos propuestas de mejora suponga una alternativa netamente superior a la del modelo original:

- La geometría 1 (caudales Iber) da unos resultados claramente peores a los del modelo original para ambas magnitudes estudiadas.
- La geometría 2 (confluencia) no da unas mejoras suficientemente consistentes como para justificar su implementación.

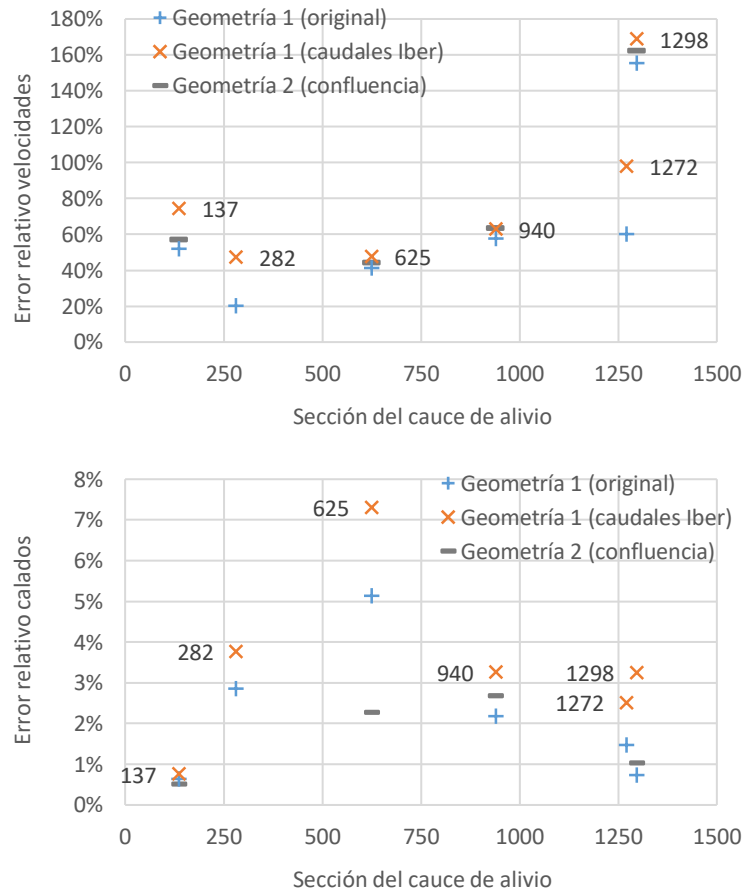


Figura 70. Comparativa de los errores relativos promedio de velocidades (arriba) y calados (abajo) en la interfase entre el cauce natural del Zadorra y el cauce de alivio.

A pesar de que se ha visto que la geometría 2 (confluencia) no logra mejorar de forma consistente las diferencias en calados y velocidades en la interfase, sí que logra mejorar el comportamiento del modelo original en otros aspectos. Éste es el caso del estudio de las curvas límite que definen el flujo normal o inverso en el Zadorra-9, que reducen su separación con las curvas obtenidas en Iber. Para evaluar esta mejora, se seleccionan un conjunto de caudales del Zadorra y se recalculan los caudales del Alegría que marcan sus límites de funcionamiento normal e inverso, siguiendo la metodología explicada en el apartado 4.1.2. También se recalculan estos caudales para una tercera geometría:

- Geometría 3 (más secciones): Se corresponde a la geometría original de Hec-Ras, sobre la que se añaden las secciones adicionales de la geometría 2 (confluencia). Dicha geometría se representa junto con las otras 2 en la Figura 71.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

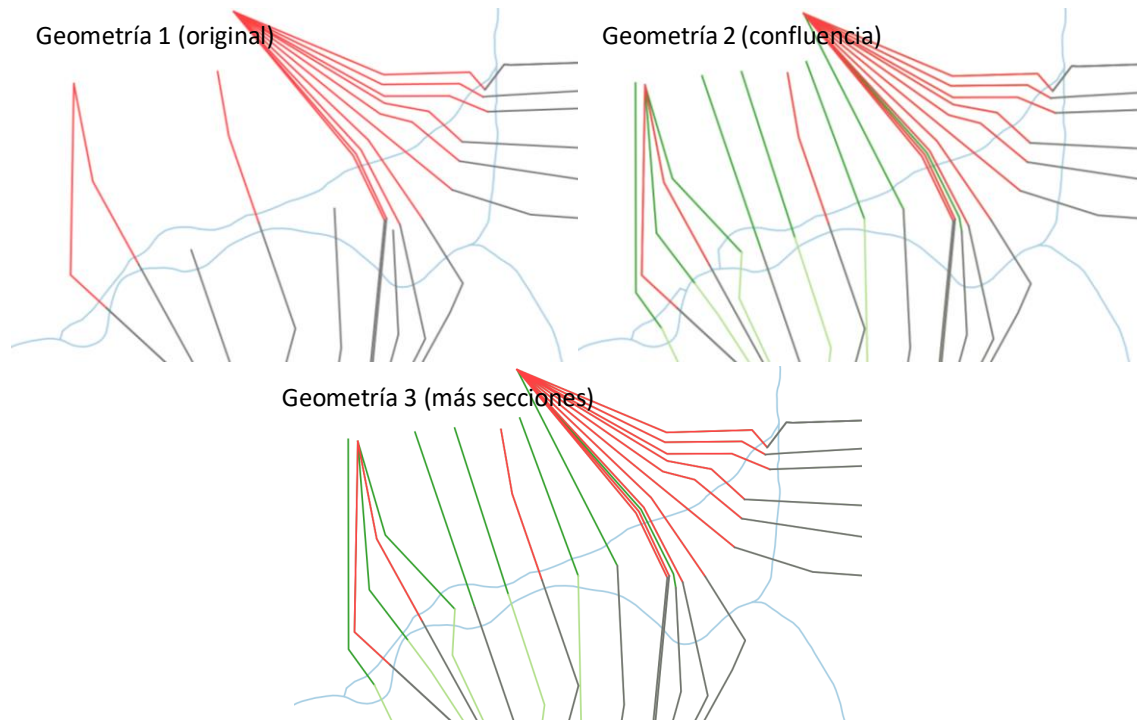


Figura 71. Geometrías que se utilizan en el análisis del comportamiento de las curvas límites que definen el dominio de flujo normal e inverso.

Las secciones en rojo y verde oscuro pertenecen al cauce de alivio, mientras que las grises y verde claro al Zadorra.

Con la geometría 2 (confluencia), el ancho de la zona frontera para la que Hec-Ras no logra dar ningún resultado presenta muy poca variación respecto al de la geometría original, tal como se puede observar en la Tabla 16. También se puede observar cómo las curvas van disminuyendo el valor de sus ordenadas, acercándose a las curvas obtenidas con el modelo Iber: se logra una disminución de la distancia entre las curvas límite de Hec-Ras e Iber de entre un 8 y un 36% (ver valores en la Tabla 18).

Si bien estas mejoras son considerables, no todas son atribuibles a la idea del tramo común y la nueva confluencia y bifurcación. Tal como se puede observar en la Figura 72, las curvas de la geometría 3 (más secciones) se encuentran entre la geometría 1 (original) y la geometría 2 (confluencia). Esto es cierto tanto para la disminución del ancho de la zona de frontera (en que Hec-Ras no puede calcular, ver Tabla 16 y Tabla 17) como para la disminución de la distancia entre las curvas de Hec-Ras e Iber (ver Tabla 18).

Caudal Zadorra (m ³ /s)	10	30	50	70	90	110
Ancho de la zona de frontera (m ³ /s)						
Geometría 1 (original)	5	6	9	14	21	25
Geometría 2 (confluencia)	5	7	9	14	20	24
Geometría 3 (más secciones)	5	6	8	13	19	24
Variación entre geometría 2 (confluencia) respecto a:						
Geometría 1 (original)	+0%	+14%	+0%	+0%	-5%	-4%
Geometría 3 (más secciones)	+0%	+14%	+11%	+7%	+5%	+0%

Tabla 16. Resultados de la variación del ancho de la zona de frontera entre curvas límites, para los tres tipos de geometrías consideradas.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.1. Estudio de la interacción entre los cauces paralelos en el modelo unidimensional

Caudal Zadorra (m^3/s)	Área zona frontera* ($\text{m}^3/\text{s})^2$	Área dominio* ($\text{m}^3/\text{s})^2$	% zona frontera
Geometría 1 (original)	1300	19000	6.8%**
Geometría 2 (confluencia)	1290	19000	6.8%
Geometría 3 (más secciones)	1210	19000	6.4%

Tabla 17. Resultados de la variación del área de la zona de frontera entre curvas límites, para los tres tipos de modelos considerados.

*Se han calculado para las seis combinaciones de caudales estudiadas: los límites del dominio son $110 \text{ m}^3/\text{s}$ en Zadorra y $190 \text{ m}^3/\text{s}$ en Alegría. **El Hec-Ras original (con todas sus combinaciones de caudales) daba un resultado de 6.7%.

Caudal Zadorra (m^3/s)	10	30	50	70	90	110
Diferencia respecto Iber de la ordenada de las curvas límite (normal/inverso, en m^3/s)						
Geometría 1 (original)	4/8	5/8	8/14	12/23	18/36	25/41
Geometría 2 (confluencia)	5/9	4/8	4/10	7/18	13/30	18/33
Geometría 3 (más secciones)	5/9	4/7	5/10	8/18	15/31	21/36
Variación entre geometría 2 (confluencia) respecto a*:						
Geometría 1 (original)	+17%	-8%	-36%	-29%	-20%	-23%
Geometría 3 (más secciones)	+0%	+9%	-7%	-4%	-7%	-11%

Tabla 18. Resultados de la variación de la diferencia entre las curvas límites de Hec-Ras con Iber, para los tres tipos de modelos considerados.

*La variación se calcula con el punto medio de los pares X/Y de la tabla $((X+Y)/2)$.

En conclusión, se confirma la importancia de disponer de la mayor cantidad de secciones posibles para definir el funcionamiento hidráulico en Hec-Ras con la mayor precisión posible. Asimismo, se comprueba que la idea de añadir una confluencia y bifurcación en un punto de interacción entre cauces paralelos también puede mejorar la precisión del modelo, aunque en un grado menor al de la adición de una mayor cantidad de secciones transversales.

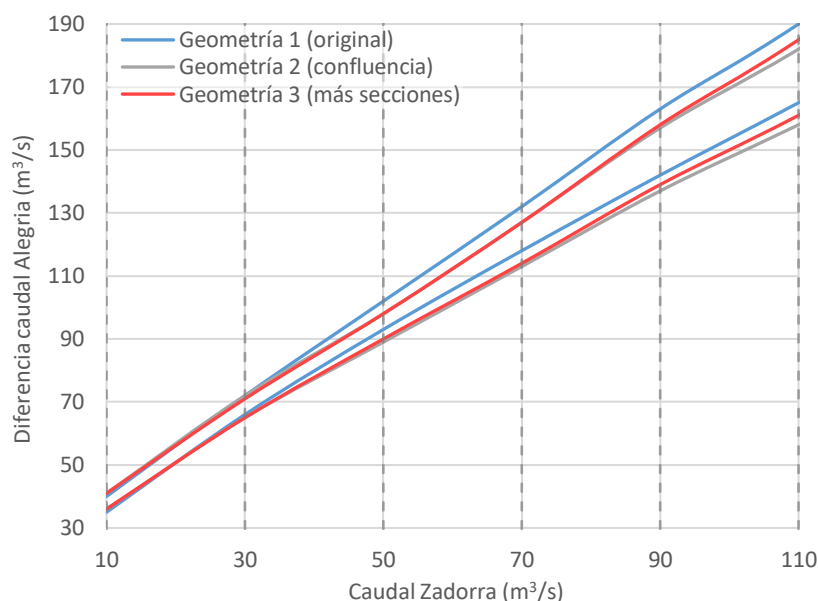


Figura 72. Recreación de la Figura 34 con los resultados recalculados para las tres geometrías consideradas.

Los seis caudales del Zadorra que se han considerado se marcan en gris discontinuo.

5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

A lo largo del estudio realizado en el apartado 5.1, se ha visto que en la interfase entre los ramales se obtienen velocidades diferentes. Con el fin de intentar solucionar este problema, se propone estudiar el desplazamiento de la interfase entre ellos. Gracias a este desplazamiento, se deberían poder equiparar las velocidades de la llanura entre ambos ramales al otorgar una mayor anchura al que presente una mayor velocidad: de esta manera, la velocidad en este cauce disminuiría, y se aumentaría la velocidad del cauce con una anchura reducida. Por lo tanto, se escogerán un par de secciones para las que se les calculará la posición óptima de la interfase, que reduzca la diferencia de velocidades entre ellas.

Una vez se haya obtenido la ubicación óptima de la interfase entre los dos ramales, se comparará el perfil de velocidades que se obtiene en Hec-Ras con el que se obtiene con Iber, con el fin de apreciar las diferencias entre ambos modelos.

5.2.1. Estudio de la ubicación de la interfase Zadorra-cauce de alivio que minimiza la diferencia de velocidades entre los dos ramales

En este apartado se planea estudiar el grado en que el desplazamiento de la interfase entre los cauces en Hec-Ras puede equilibrar la diferencia de velocidades que se ha detectado en el apartado 5.1.1 para la geometría original.

Para ello, se ha de escoger la sección y la combinación de caudales que se utilizará para equilibrar la velocidad entre los ramales:

- Se escogen dos secciones diferentes, las identificadas con las etiquetas 218 y 282 en Hec-Ras. Estas secciones se han escogido por ser aquellas más próximas a la zona dónde se ha detectado una mayor interacción entre los dos ramales (recordar Figura 62, ver su ubicación en la Figura 73). Se describe a continuación el motivo de la elección de cada sección:
 - En la sección 218 se produce interacción entre los ramales en casi todas las combinaciones de caudales de la Tabla 12. Esto es así porque entre los dos ramales no existe apenas obstáculo topográfico, e incluso podría verse como un gran cauce único. En este caso, al no existir llanura de inundación, se desplazará la interfase entre ramales hasta conseguir equilibrar la velocidad en ambos cauces. Al no existir esta sección en la geometría 1 (original), se usa en su lugar la geometría 3 (más secciones). Se representa en la Figura 74 (izquierda).
 - La sección 282 se escoge por tener una pequeña llanura de inundación entre ambos ramales, además de porque en ella se produce interacción en un gran número de combinaciones de caudales. En este caso, se desplazará la interfase hasta conseguir que las velocidades en la llanura de los ramales sea suficientemente parecida. A diferencia de la sección 218, como esta sección ya existe en la geometría original no hace falta utilizar ninguna otra geometría. Se representa en la Figura 74 (derecha).

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

- La estrategia que se sigue con las combinaciones de caudales es la siguiente: primero se calcula la posición óptima de la interfase para la combinación de caudales más pequeña de las de la Tabla 12. Una vez ubicada la interfase óptima, se calcula la diferencia en velocidades para combinaciones de caudales mayores, para comprobar si la mejora en la diferencia de caudales se mantiene si se cambia el caudal de agua que circula por la sección. A continuación se detallan las combinaciones de caudales que se usa en cada sección (se resumen en la Tabla 19):
 - Sección 218. El cálculo de la interfase óptima se realiza para caudales de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Zadorra y $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Alegría. Las combinaciones de caudales que se usan posteriormente mantendrán el valor del Zadorra de la Tabla 12, pero actualizando el valor del Alegría para mantener la misma relación Alegría/Zadorra que en el caso de optimización (relación 2/3).
 - Sección 282. El cálculo de la interfase óptima se debería realizar para caudales de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ tanto en Zadorra como Alegría, al ser la primera combinación en que se produce interacción entre ramales. Aun así, como en este caso las velocidades sobre la llanura son iguales para ambos ramales, no es posible optimizar la interfase (porque ya lo está). Por ello, se decide utilizar la siguiente combinación de la Tabla 12 ($80 \text{ m}^3/\text{s}$ en Zadorra y $70 \text{ m}^3/\text{s}$ en Alegría). Para la selección de los caudales mayores, se seleccionan los mismos caudales del Zadorra de la Tabla 12 y se le asignan valores del Alegría que sigan la misma relación Alegría/Zadorra que en los casos estudiados: relación 1/1 por el caso en que la interfase ya estaba en su posición óptima desde un inicio, y 7/8 para el caso en que se ha desplazado la interfase para obtener esta posición óptima.

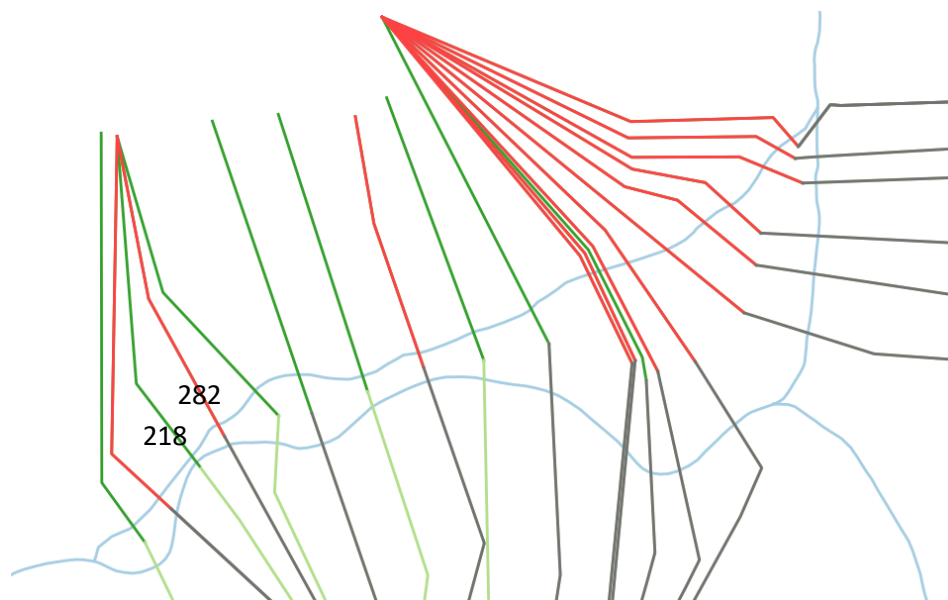


Figura 73. Ubicación de las secciones en que se estudia la posición óptima de la interfase con el objetivo de equiparar el perfil de velocidades de la llanura entre los dos ramales. Se recuerda que la geometría 1 (original) sólo dispone de las secciones representadas en rojo y gris. Las secciones en verde son un añadido de la geometría 3 (más secciones).

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

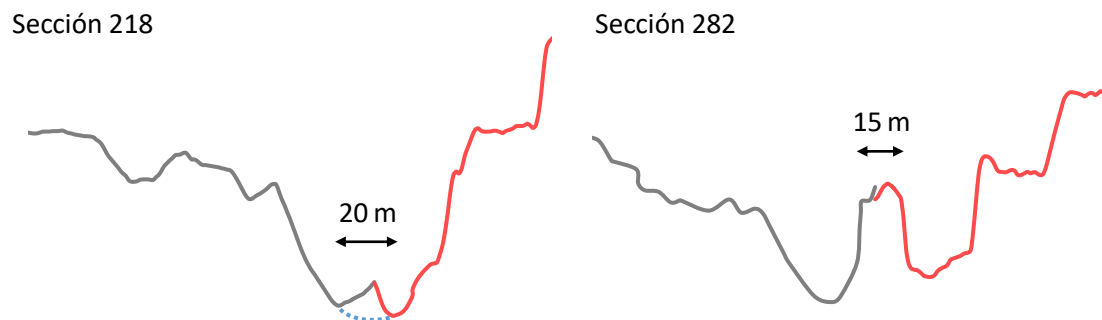


Figura 74. Representación de las secciones con las que se estudiará la posición óptima de la interfase. Se puede observar como la sección 218 casi podría actuar como un solo cauce (si por ejemplo su fondo fuese la línea azul discontinua) al no disponer de llanura entre ambos ramales. En cambio, en la sección 282 sí que se distinguen claramente ambos ramales.

Caudales usados en la sección 218						
Caudal Zadorra (m^3/s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegría (m^3/s)	20	33.3	53.3	66.7	80	133.3
Caudales usados en la sección 282, en que no se modifica la interfase						
Caudal Zadorra (m^3/s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegría (m^3/s)	20	50	80	100	120	200
Caudales usados en la sección 282, en que se modifica la interfase						
Caudal Zadorra (m^3/s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegría (m^3/s)	20	50	70	87.5	105	175

Tabla 19. Combinaciones de caudales que se utilizan para calcular la posición óptima de la interfase, así como para verificar la validez de esta posición para caudales mayores.

Se somborean en verde las combinaciones para las que se obtiene la posición óptima de la interfase: las combinaciones superiores a estas mantienen el valor del Zadorra, pero adaptan el del Alegría para mantener la misma relación Alegría/Zadorra que el caso sombreado.

Una vez explicadas las secciones en que se calculará la posición óptima de la interfase y las combinaciones de caudales con que se validará la bondad de esta posición, se procede al proceso de cálculo de dicha posición óptima. Este proceso será iterativo: en un principio, se va asignando un mayor ancho en aquel ramal en que se observe una mayor velocidad con el objeto de reducir su velocidad, tal como se ha explicado en la introducción de este apartado 5.2.

Para ahorrarse la visualización de todos los casos intermedios ejecutados, se muestran directamente los resultados finales. Así pues, en la Figura 75 y Figura 76 se muestra la distribución de velocidades original y optimizada, para cada una de las secciones. Se incluye también la distribución de velocidades original de la sección 282 para el caso de caudales de 50 m^3/s en Zadorra y Alegría, con el que ya se consiguen diferencias de velocidades nulas en la llanura sin haber de desplazar su interfase (Figura 77).

Se adjuntan en tablas (Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22) los resultados de las diferencias de velocidad obtenidas con todas las combinaciones de caudales consideradas en la Tabla 19, tanto para la posición original de la interfase como para su posición optimizada. De esta manera se puede evaluar la bondad del desplazamiento de la interfase respecto a su posición original.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

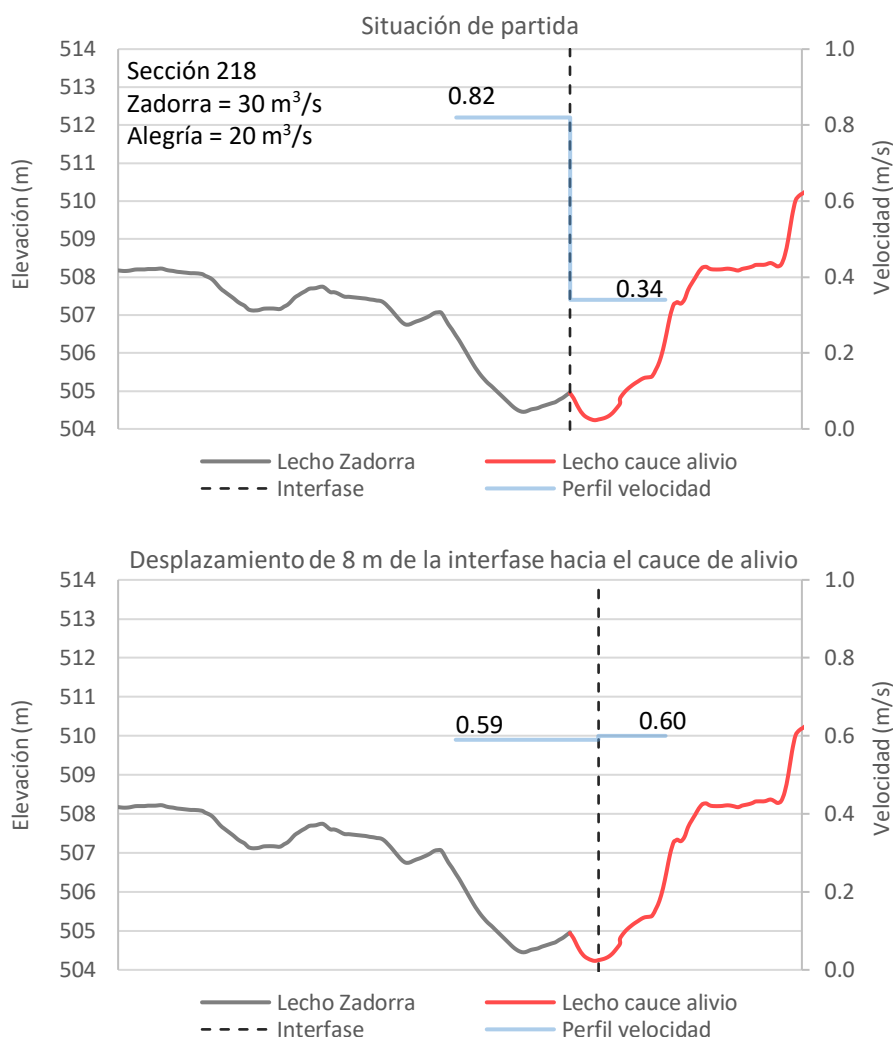


Figura 75. Evolución del proceso de optimización de la posición de la interfase de la sección 218, junto con sus perfiles de velocidades en ambos ramales.
Cómo se puede observar en la última figura, se tiene que colocar la interfase en la mitad del cauce de alivio para lograr el equilibrio de velocidades.

Caudal Zadorra (m ³ /s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegría (m ³ /s)	20	33.3	53.3	66.7	80	133.3
Caso original, sin desplazamiento de la interfase						
Velocidad Zadorra (m/s)	0.82	0.8	0.85	0.89	0.9	0.92
Velocidad cauce alivio (m/s)	0.34	0.44	0.61	0.73	0.83	1.14
Error relativo	83%	58%	33%	20%	8%	21%
Mayor velocidad en...	Zadorra	Zadorra	Zadorra	Zadorra	Zadorra	C. alivio
Caso optimizado, con un desplazamiento de la interfase de 8 m hacia el cauce de alivio						
Velocidad Zadorra (m/s)	0.59	0.6	0.66	0.69	0.71	0.76
Velocidad cauce alivio (m/s)	0.6	0.72	0.97	1.14	1.27	1.63
Error relativo	2%	18%	38%	49%	57%	73%
Mayor velocidad en...	C. alivio	C. alivio	C. alivio	C. alivio	C. alivio	C. alivio

Tabla 20. Resumen de los resultados obtenidos con la optimización de la ubicación de la interfase de la sección 218 para los casos de estudio definidos.
En verde se marca el caso mostrado en la Figura 75.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

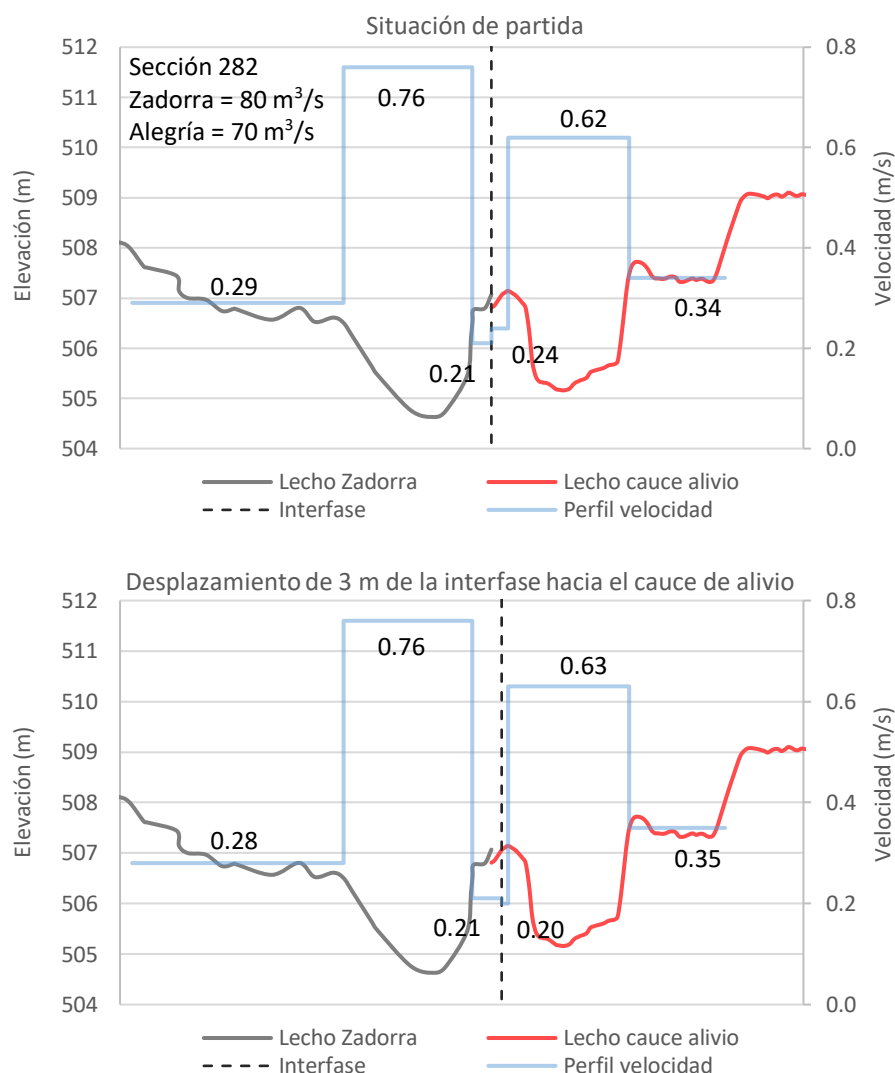


Figura 76. Evolución del proceso de optimización de la posición de la interfase de la sección 282, junto con sus perfiles de velocidades en ambos ramales.

Caudal Zadorra (m³/s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegria (m³/s)	20	50	70	87.5	105	175
Caso original, sin desplazamiento de la interfase						
Velocidad Zadorra (m/s)		0.16	0.21	0.23	0.24	0.38
Velocidad cauce alivio (m/s)		0.16	0.24	0.28	0.31	0.52
Error relativo		0%	13%	20%	25%	31%
Mayor velocidad en...		-	C. alivio	C. alivio	C. alivio	C. alivio
Caso optimizado, con un desplazamiento de la interfase de 3 m hacia el cauce de alivio						
Velocidad Zadorra (m/s)		0.15	0.21	0.23	0.24	0.39
Velocidad cauce alivio (m/s)		0.13	0.20	0.23	0.25	0.42
Error relativo		14%	5%	0%	4%	7%
Mayor velocidad en...		Zadorra	Zadorra	-	C. alivio	C. alivio

Tabla 21. Resumen de los resultados obtenidos con la optimización de la ubicación de la interfase de la sección 282 para los casos de estudio definidos.

En verde se marca el caso mostrado en la Figura 76. Se tachan los casos que no se produce interacción entre los dos ramales.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

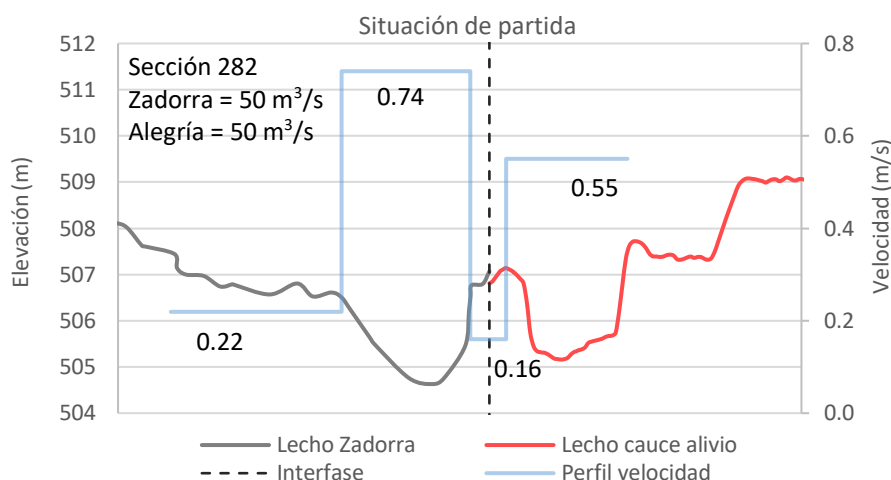


Figura 77. Perfil de velocidades en ambos ramales de la sección 282 para el caso de 50 m³/s en Zadorra y Alegría y posición original de la interfase.

Cómo se puede ver, para la combinación de caudales mostrada las velocidades en la llanura coinciden en ambos ramales: no es necesario desplazar la interfase para minimizar la diferencia de velocidades.

Caudal Zadorra (m ³ /s)	30	50	80	100	120	200
Caudal Alegría (m ³ /s)	20	50	80	100	120	200
Caso original, sin desplazamiento de la interfase						
Velocidad Zadorra (m/s)		0.16	0.22	0.24	0.24	0.27
Velocidad cauce alivio (m/s)		0.16	0.25	0.29	0.32	0.41
Error relativo		0%	13%	19%	29%	41%
Mayor velocidad en...		-	C. alivio	C. alivio	C. alivio	C. alivio

Tabla 22. Resumen de los resultados obtenidos con la posición original de la interfase de la sección 282 para los casos de estudio definidos.

En verde se marca el caso de la Figura 77. Se tachan los casos que no se produce interacción entre los dos ramales.

Del cálculo de la posición de la interfase y de las diferencias de las velocidades para caudales mayores se observan los siguientes aspectos:

- La idea original de que con un aumento del ancho de la sección con mayor velocidad se logra equilibrar las velocidades se cumple en la sección 218, pero no en la llanura de inundación de la sección 282.
- La optimización para un caudal pequeño en la sección 218 empeora los resultados para el resto de combinaciones de caudales superiores. Con la nueva posición de la interfase, el error relativo medio de los seis casos corridos es de un 40%, por un 37% original (errores absolutos de 0.39 m/s por 0.26 m/s con la interfase original).
- Sin embargo, la optimización de la posición de la interfase para un caudal pequeño en la sección 282 sí que mejora los resultados para el resto de combinaciones de caudales. Se consigue un error relativo de un 6% respecto al 18% original (errores absolutos de 0.01 m/s por los 0.06 m/s originales). Esto podría indicar que para lograr una optimización de la interfase robusta, es preferible trabajar con combinaciones de caudales moderadas: trabajar con caudales pequeños como se ha hecho en la sección 218 provoca que la interfase no funcione correctamente para caudales muy elevados.

A modo de recapitulación, se ha observado como con el movimiento de la interfase entre los dos ramales paralelos se pueden reducir las diferencias en velocidades observadas en el apartado 5.1. Este movimiento de la interfase se debe realizar preferentemente para un caudal medio, en relación a los caudales que se quieren simular con el modelo Hec-Ras. Si se escoge una posición de la interfase en función de caudales pequeños, se corre el riesgo de que para caudales mayores no se haya solucionado (o incluso que se haya agravado) el problema de la diferencia de velocidades entre ramales.

5.2.2. Comparativa de la distribución de velocidades en Hec-Ras y en Iber

Partiendo de los perfiles de velocidad obtenidos en el apartado anterior, se pretende comparar los perfiles obtenidos en Hec-Ras con los que se obtiene en Iber. Para ello, dado que Hec-Ras no puede dar perfiles de velocidades tan complejos y detallados como Iber (únicamente un valor por cada llanura de inundación), se comparan las siguientes magnitudes:

- Velocidad media, calculada igual que en el apartado 4.3.1 (ver Figura 59): se calcula cómo el área bajo la curva de velocidades dividida por el ancho de la superficie de agua (compuesto en este caso por ambos ramales, ya que se produce interacción entre ellos).
- Coeficiente de Coriolis, para obtener una idea de hasta qué punto la forma de la distribución de velocidades en Iber difiere de la distribución de Hec-Ras. Este coeficiente se utiliza para corregir el término cinético del trinomio de Bernoulli al introducir el efecto de la no uniformidad de la distribución de velocidades en una sección¹². Se calcula con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\int v^3 dA}{V^3 \cdot A} \approx \frac{\sum v^3 \Delta A}{V^3 \cdot A}$$

Dónde:

- α es el coeficiente de Coriolis. Cómo el perfil de velocidades de Hec-Ras e Iber se consiguen mediante una serie de valores discretos, se calcula con la expresión de la derecha. Este coeficiente indica la uniformidad del perfil de velocidades de una sección: tomará un valor de 1 para una distribución de velocidades uniforme, y valores superiores cuánto más no uniforme sea esta distribución. En la Figura 78 se ilustra este concepto.
- v es la velocidad en cada punto del perfil de velocidades.
- V es la velocidad media de la sección.
- A es el área de flujo. Cómo Iber considera una componente vertical de la velocidad uniforme, se elimina esta componente del cálculo del coeficiente de Coriolis. De esta manera, se utiliza el ancho de flujo (en lugar del área).

¹² El trinomio de Bernoulli se utiliza para calcular la energía de una sección. Aplicado a la sección de un río, consta de la suma de la energía potencial (cota de la solera de la sección), la energía de presión (el calado de la sección, para ríos de pendientes pequeñas) y la energía cinética ($\alpha V^2/2g$, en que α es el coeficiente de Coriolis y V es la velocidad media de la sección).

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

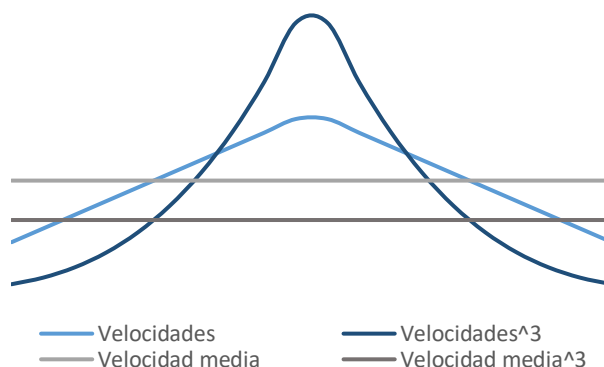


Figura 78. Ejemplo del cálculo del coeficiente de Coriolis.

En la figura se puede observar un perfil de velocidades no uniforme (azul). Al elevar sus valores al cubo, se exagera su no uniformidad (naranja) respecto al cubo del valor medio de la velocidad (amarillo). En un perfil uniforme, ambas curvas serían la misma.

A continuación se presentan los perfiles de velocidades obtenidos en ambos modelos, para las dos secciones estudiadas en el apartado 5.2.1 anterior. El perfil de velocidades de Hec-Ras que se va a utilizar en esta comparativa es el que se obtiene con la geometría con la posición optimizada de la interfase, con la que se reduce la diferencia de las velocidades entre los dos ramales del río.

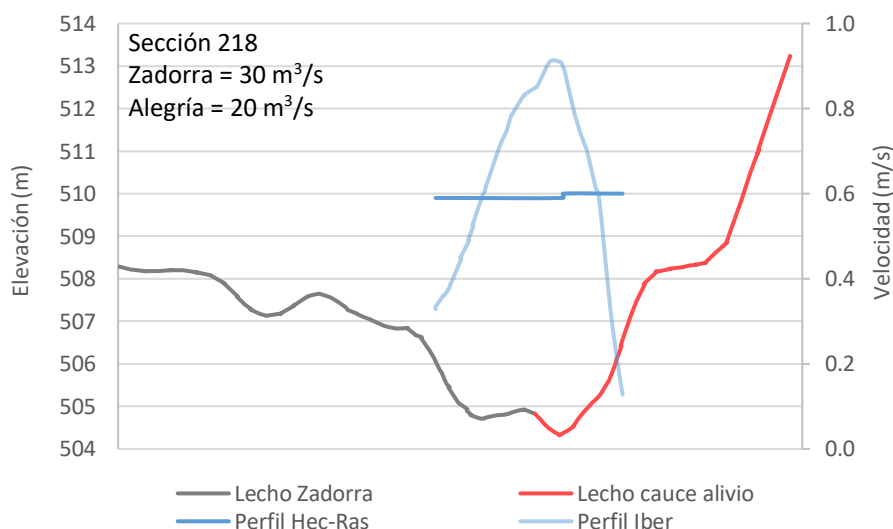


Figura 79. Comparación de los perfiles de velocidad obtenidos en Hec-Ras e Iber en la sección 218 para caudales de 30 m³/s en el Zadorra y 20 m³/s en el Alegria, sobre la topografía obtenida en Iber.

Casos de estudio	Integral (m²/s)	Velocidad media (m/s)	Coeficiente de Coriolis
Hec-Ras optimizado	34.59	0.59	1.00
Iber	38.55	0.64	1.30
Error relativo*	11%	8%	-

Tabla 23. Comparación de la distribución de velocidades de los modelos Hec-Ras e Iber, para la sección 218 bajo unos caudales de 30 m³/s en el Zadorra y 20 m³/s en el Alegria.

*El error relativo se calcula como la diferencia entre Iber y Hec-Ras dividido por el valor de Hec-Ras.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio

5.2. Estudio de la distribución de velocidades de una sección en los modelos 1D y 2D

Como se puede observar en el caso de la sección 218, el modelo unidimensional se distancia aproximadamente en un 10% del modelo bidimensional tanto en el valor de la integral bajo la curva de velocidades como en la velocidad media. Sin embargo, ambos modelos se distancian significativamente en el valor del coeficiente de Coriolis: esto se debe a que los perfiles de velocidad que puede proporcionar Hec-Ras, con sus 3 valores por sección (llanura izquierda, cauce central y llanura derecha) son muy limitados respecto a los que proporciona Iber, que puede proporcionar una gran cantidad de valores discretos a lo largo de la sección.

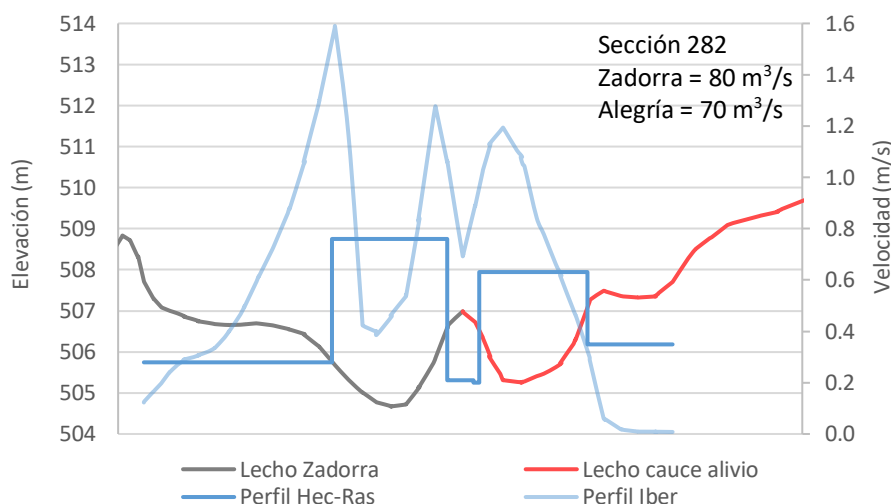


Figura 80. Comparación de los perfiles de velocidad obtenidos en Hec-Ras e Iber en la sección 282 para caudales de 80 m³/s en el Zadorra y 70 m³/s en el Alegría, sobre la topografía obtenida en Iber.

Casos de estudio	Integral (m ² /s)	Velocidad media (m/s)	Coeficiente de Coriolis
Hec-Ras optimizado	80.33	0.46	1.63
Iber	96.05	0.62	2.48
Error relativo*	20%	34%	-

Tabla 24. Comparación de la distribución de velocidades de los modelos Hec-Ras e Iber, para la sección 282 bajo unos caudales de 80 m³/s en el Zadorra y 70 m³/s en el Alegría.

*El error relativo se calcula como la diferencia entre Iber y Hec-Ras dividido por el valor de Hec-Ras.

En la sección 282, las magnitudes comparadas difieren más entre ambos modelos. La diferencia en la velocidad media de la sección en llega a representar un 34% de la velocidad media obtenida en Hec-Ras (por un 8% obtenido en la sección 218). La forma del perfil de velocidades también difiere bastante entre ambos modelos, tal como se puede apreciar en los valores del coeficiente de Coriolis. Aun así, Hec-Ras acierta al asignar una mayor velocidad al cauce del Zadorra, tal como sucede también en Iber. Las diferencias entre ambos modelos pueden deberse a la presencia del azud de la antigua piscina fluvial de Gamarra en esta sección. Aunque se ha intentado respetar las características del azud en ambos modelos, las diferencias al introducir la geometría de un azud en Hec-Ras e Iber hacen que este azud en particular suponga una mayor obstrucción al flujo en el modelo unidimensional que en el bidimensional.

En conclusión, es poco realista pedir a Hec-Ras que replique los perfiles de velocidades que se obtienen en Iber: aun así, si se comparan magnitudes de valores medios se observa como ambos modelos presentan valores parecidos, tal como se desprende de los resultados de la sección 218.

5.3. Impacto de un tratamiento igual de las rugosidades en los modelos 1D y 2D

En el apartado 4.1.2 se aventura que uno de los causantes de las diferencias en el rendimiento entre el modelo Hec-Ras y el modelo Iber es *“la introducción de parámetros idénticos en ambos modelos, cuando en realidad deberían variar en función del modelo en que se introduzcan”*. Incluso se apunta a los valores de la rugosidad como un ejemplo de estos parámetros que deberían tratarse por separado para cada modelo. En este apartado se trata de comprobar la validez de esta hipótesis.

La idea de que la rugosidad introducida en un modelo unidimensional no debería ser idéntica a la introducida en un modelo bidimensional se basa en las limitaciones que presenta el modelo y que se han de compensar sobredimensionando su valor de la rugosidad. A efecto de ilustrar esta disparidad entre los modelos, se toma por ejemplo el método de Cowan para determinar la rugosidad de un cauce. Según éste método, se han de considerar una serie de parámetros de forma conjunta para definir la rugosidad del cauce, tal cómo se puede ver en la siguiente expresión:

$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) \cdot m$$

Dónde:

- n_1 es el valor de la rugosidad del material del lecho.
- n_2 es un factor de corrección según las irregularidades de la superficie del lecho. Toma valores entre 0.000 y 0.020.
- n_3 es un factor de corrección según variaciones en las secciones transversales. Toma valores entre 0.000 y 0.015.
- n_4 es un factor de corrección según las obstrucciones en el cauce. Toma valores entre 0.005 y 0.100.
- n_5 es un factor de corrección según el efecto de la presencia de vegetación. Toma valores entre 0.000 y 0.060.
- m es un factor de corrección según la sinuosidad del cauce. Toma valores entre 1.000 y 1.300.

En un modelo unidimensional la mayoría de estos parámetros no se consideran en el cálculo. Por lo tanto, el valor de la rugosidad introducido en un modelo unidimensional debería ser superior a la rugosidad del material del lecho, para poder compensar todos los efectos que el modelo no contempla. En cambio, un modelo bidimensional sí que incorpora en sus cálculos estos elementos que no puede incorporar el modelo unidimensional (irregularidades de superficie, variaciones en las secciones transversales, sinuosidad del curso del río), y por tanto para definir sus coeficientes de rugosidad se puede prescindir de incorporar estos parámetros. En consecuencia, las rugosidades que se han de incorporar al modelo bidimensional podrían ser iguales a las del material del lecho e inferiores a las introducidas en el modelo unidimensional.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.3. Impacto de un tratamiento igual de las rugosidades en los modelos 1D y 2D

Por lo tanto, un posible causante de la diferencia entre las curvas límites de Hec-Ras e Iber podría ser el tratamiento de la rugosidad. Con el fin de discutir esta hipótesis, se han ejecutado dos casos adicionales en Iber, aplicando una reducción del 25% a los valores de rugosidad utilizados en el modelo. Con estas nuevas rugosidades, se espera que se reduzca la diferencia entre las curvas de Hec-Ras e Iber.

Los dos casos ejecutados son casos que con las rugosidades originales presentaban un flujo inverso en el Zadorra-9, con valores de caudal del Alegría próximos a la curva límite de este dominio. Si el objetivo es que Iber reduzca sus diferencias con Hec-Ras, se espera que estos dos casos, que ahora son por poco de flujo inverso, pasen a tener tramos de flujo bidireccional (por tanto, caerían dentro de la zona de frontera de la Figura 82) o bien tener un flujo aguas abajo (flujo normal).

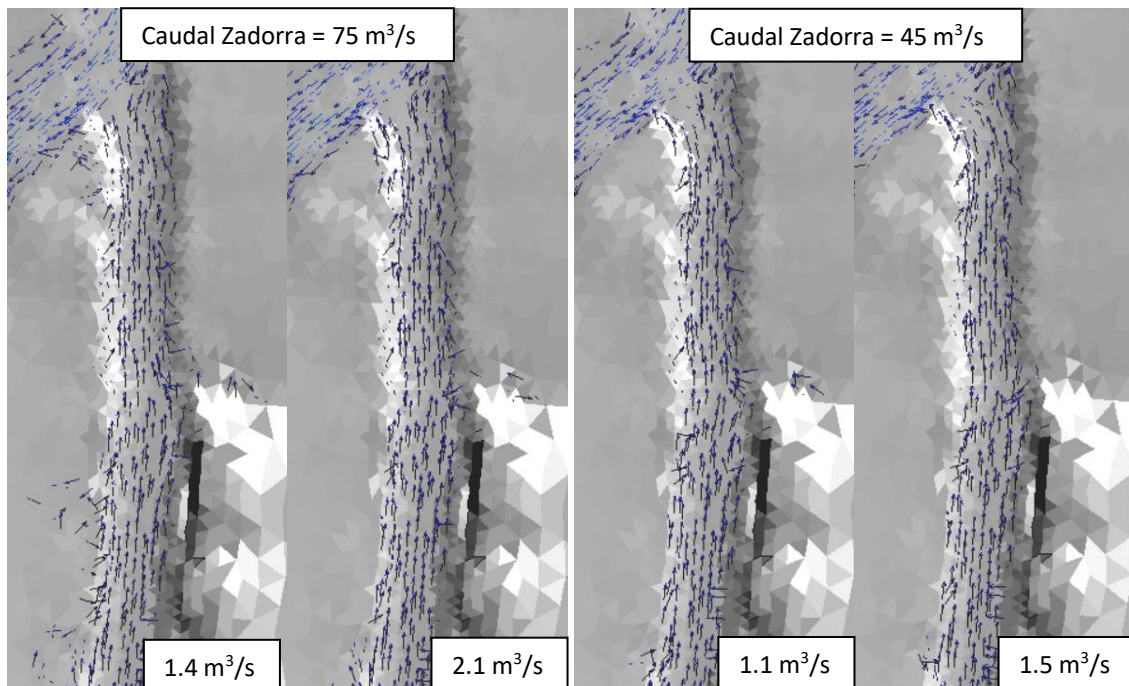


Figura 81. Comparación entre los resultados para las rugosidades originales (izquierda) y para las rugosidades reducidas en un 25% (derecha) para los dos casos de estudio. Se indica en cada figura cuál es el caudal que remonta el Zadorra-9 aguas arriba. Se puede ver cómo este caudal aumenta para los casos de menor rugosidad.

De este pequeño estudio se ha podido comprobar que la hipótesis de la rugosidad como uno de los factores de discrepancia entre los dos modelos de cálculo queda descartada. Con una reducción de los valores de la rugosidad, las mismas combinaciones de caudales están incrementando su caudal en sentido aguas arriba en el Zadorra-9, reduciendo las pequeñas irregularidades que se podían observar en su flujo. Esto indica que la zona de frontera se aleja respecto a las rugosidades originales, y por tanto las curvas límite de Hec-Ras e Iber también se alejan entre ellas (ver Figura 82).

A pesar del error al considerar la rugosidad como un factor que influye en los diferentes resultados entre los dos modelos, es posible que haya otros factores que el modelo Iber incorpora en su formulación (fricción agua con agua, inercia, fuerzas laterales) que sí que sean responsables de esta diferencia.

5. Limitaciones de los modelos hidráulicos en su aplicación en la zona de estudio
5.3. Impacto de un tratamiento igual de las rugosidades en los modelos 1D y 2D

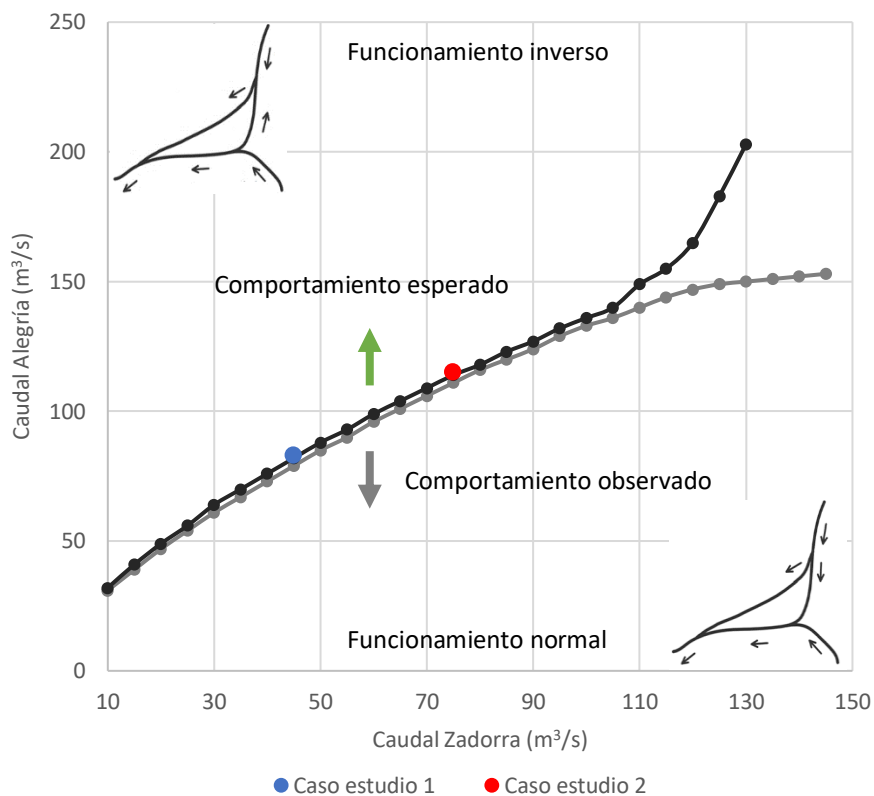


Figura 82. Representación del comportamiento esperado y observado de los límites de las zonas de dominio en función de los resultados obtenidos con la reducción de rugosidades en Iber.

6. Conclusiones

Una vez se ha concluido el estudio del comportamiento del sistema fluvial y de los modelos de cálculo utilizados para su simulación, se resumen las principales conclusiones obtenidas:

- La configuración del sistema fluvial, con un cauce de alivio que se lleva parte del caudal del Zadorra y un afluente importante como es el Alegría que desemboca en medio del tramo desdoblado del Zadorra, puede dar lugar a dinámicas inesperadas. En concreto, se ha observado que para caudales elevados del Alegría (del orden de cuatro a dos veces superior al del Zadorra, en función del caudal del Zadorra) el flujo de agua de este afluente logra remontar parte del Zadorra hasta llegar al azud de derivación situado aguas arriba. Cuando esto sucede, la totalidad del caudal del Zadorra se conduce aguas abajo a través del cauce de alivio.
- Hay todo un intervalo de caudales para los que Hec-Ras no es capaz de encontrar una solución al cálculo del flujo, sin importar que se considere que el Alegría remonta aguas arriba o no hasta el azud de derivación. Esta zona que no puede calcular se corresponde con casos en que el flujo no circula ni en un sentido ni en otro, en que se supone que el Zadorra está en reposo entre el azud y la confluencia con el Alegría. Se ha observado que la adición de secciones a la geometría de los ramales del Zadorra reduce ligeramente este intervalo de caudales sin solución. Limitándose a caudales máximo de 110 m³/s en el Zadorra y 190 m³/s en el Alegría, el porcentaje de combinaciones de caudales sin solución es de un 6.8% en la geometría original, por un 6.4% en el caso con más secciones.
- El principal elemento para conducir parte del caudal del Zadorra a su cauce de alivio es el azud de derivación, ubicado en el punto en que se bifurca el río en sus dos ramales. Se ha podido comprobar como para las combinaciones en que el Zadorra presenta problemas de inundación en la Llanada Alavesa el azud trabaja alejando un mínimo del 40% del caudal del Zadorra lejos de la periferia norte de la ciudad. Se observa también que este porcentaje de agua derivada es más sensible a un aumento del caudal de entrada del Alegría que del Zadorra, confirmando una vez más la gran influencia que tiene el afluente en el comportamiento de todo el sistema fluvial.
- El azud de derivación presenta una geometría particular, con una abertura en su parte central por la que se permite la circulación del río para episodios de aguas bajas. Esto abre la puerta a plantear una modificación de esta geometría con el objeto de cambiar su rendimiento al derivar el caudal del Zadorra por el cauce de alivio. Después de estudiar el efecto de dicha abertura en el reparto de caudales, se observa que un ensanchamiento de la misma apenas varía los resultados de la abertura original. Sin embargo, estrechar la abertura provoca un aumento más pronunciado del caudal derivado al cauce de alivio. Se ha observado asimismo que para caudales elevados del Zadorra las dimensiones de la abertura del azud pierden su influencia en el reparto de caudales. Este caudal del Zadorra necesario para que el río ignore la abertura del azud varía de forma inversa al del Alegría: para mayores caudales del Alegría, el caudal necesario del Zadorra es menor, y viceversa.

- El buen trabajo del azud de derivación al derivar agua por el cauce de alivio permite una reducción apreciable del calado en el Zadorra a su paso por la periferia norte de Vitoria. Gracias a estas reducciones de calado, que alcanzan valores del 20% del valor original, ha sido posible disminuir la peligrosidad de inundación en esta zona de la ciudad. Por otro lado, esta obra de defensa de carácter local no agrava la peligrosidad del río aguas abajo de la confluencia de los dos ramales, al no observarse apenas variaciones ni en los calados ni en las velocidades del flujo.
- Entre los dos ramales del Zadorra en el modelo 1D, se ha establecido una frontera (a la que se le ha dado el nombre de interfase) dónde acaba la sección de un ramal y empieza la del otro. Se ha visto que el cálculo trata esta interfase como si fuese un muro invisible e infranqueable. Por tanto no existe interacción entre el flujo de los ramales, aun cuando el nivel del agua supere cualquier obstáculo topográfico entre ellos. Esto puede llevar a situaciones irreales en que en la misma llanura de inundación el agua por un ramal tiene una velocidad o nivel diferente a la del ramal contiguo. Para solucionar esta incongruencia, se puede desplazar la posición de la interfase entre ambos ramales y de esta manera reducir a un mínimo la diferencia entre velocidades a un lado y otro. Para calcular la posición óptima de esta frontera, se recomienda trabajar con unos caudales en el centro del intervalo de caudales que se quieren aplicar a la geometría: de esta manera, la diferencia de velocidades será más robusta cuando se le apliquen caudales diferentes a los de la optimización.
- A pesar de que se puede mejorar el modelo Hec-Ras para aproximar el comportamiento del flujo en la interfase a la realidad, seguirá sin saber representar los trasvases de agua entre los diversos ramales, a diferencia del modelo bidimensional. Una posibilidad para solucionar esta limitación es introducir en su geometría los puntos de trasvase de agua como puntos de confluencia seguidos inmediatamente de una bifurcación: aun así, esta solución no es ideal porque requiere un conocimiento previo de dónde se producen estos desbordamientos, conocimiento del que no siempre se podrá disponer. Se ha observado que con la introducción de los puntos de confluencia y bifurcación el modelo Hec-Ras replica bastante bien el sentido (pero no la magnitud) de los intercambios de caudal que se observan en Iber, perdiendo precisión a medida que aumentan los caudales de entrada al sistema. Esta idea tampoco soluciona el problema de las diferencias de velocidades calculadas en la interfase, aunque sí contribuye a reducir la diferencia de niveles.

7. Futuras líneas de investigación

Tras la finalización del estudio, se identifican toda una serie de aspectos que podrían abordarse en futuras estudios que ampliasen el conocimiento sobre el sistema fluvial formado por el Zadorra, cauce de alivio y Alegría:

- Recalcular los límites de los dominios de caudales en Iber para los que se da un flujo aguas abajo o aguas arriba en el Zadorra. En este estudio se ha usado un método con un alto grado de subjetividad para calcular estos límites, con lo que se propone recalcular estos límites usando el método objetivo que se describe en el apartado 4.1.2.
- De haberse recibido por parte de URA el proyecto del cauce de alivio de 2004, se podrían haber estudiado las hipótesis utilizadas en su diseño y contrastarlas con los resultados obtenidos en este estudio.
- El proyecto del cauce de alivio de 2004 hubiera permitido recuperar la topografía de la zona previa a la construcción del cauce de alivio. Con esta topografía, se podría crear una malla de Iber más precisa que la utilizada en este estudio, y por lo tanto se podría simular con más precisión la comparativa entre la situación actual y la original.
- La comparación entre el escenario actual y el anterior a la implementación del cauce de alivio sólo se ha hecho para casos en que el caudal del Alegría era nulo. En una ampliación del estudio se podría realizar la misma comparación para nuevos casos en que el caudal del Alegría no fuera nulo. Un buen punto de partida sería el del cálculo del caso en que el Alegría toma un valor del 60% del caudal del Zadorra, ya que se ha visto que esta relación es la que se da de media entre las mediciones diarias tomadas en estos ríos. Se considera que con el estudio de estos nuevos casos se podrá valorar con más detalle la mejora que se introdujo con el cauce de alivio al reducir la peligrosidad de inundación en la periferia norte de Vitoria.
- Por último, sabiendo que la CHE tenía planeados nuevos cauces de alivio como el que se ha estudiado a lo largo del curso del Zadorra en la Llanada Alavesa, se podría haber estudiado cómo dimensionar los nuevos azudes de derivación necesarios para el funcionamiento de estos nuevos cauces de alivio.

8. Bibliografía

Chou, V. T., 1959. ***Open-channel Hydraulics***. 22nd printing. Singapore: McGraw-Hill, 1986. ISBN 0-07-Y85906-X.

Confederación Hidrográfica del Ebro, 2008. ***Plan hidrológico de los ríos Bayas, Zadorra e Inglares (documentación previa para su análisis, versión V.2)***.

Confederación Hidrográfica del Ebro, 2015. Anejo 3 a la memoria: Justificación de las medidas estructurales del plan. ***Plan de gestión del riesgo de inundación***.

Martín Vide, J.P., 2006. ***Ingeniería de ríos***. Edicions UPC. Barcelona. ISBN 9788483019009.

Peñas Sánchez, V., 2006. ***El río Zadorra: Análisis ecogeográfico de las intervenciones antrópicas en el ecosistema fluvial (1932-2004)***. Vitoria: Universidad del País Vasco. Tesis doctoral presentada en la Universidad del País Vasco.

UPC, 2017. ***Estudio del efecto de los dragados y tratamientos de la vegetación en la inundabilidad de un tramo del río Zadorra***. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Vionnet, C.A.; Tassi, P.A.; Martín Vide, J.P., 2004. "Estimates of flow resistance and Eddy viscosity coefficients for 2D modelling on vegetated floodplains". ***Hydrological Processes***, 18: 2907-2926.